



9CFE-1336

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



Límites operativos de los riegos prescritos en la defensa contra incendios en áreas de Interfaz Urbano - Forestal mediante cortafuegos verdes

DALMAU-ROVIRA, F. (1); QUINTO PERIS, F. (1); CARRASCO RODRIGUEZ, Y. (1); SAMBLÀS VIVES, E. (1);

(1) Medi XXI Gabinet de Solucions Ambientals S.L.

Resumen

Los riegos prescritos mediante el uso de agua regenerada procedente de las propias áreas urbanas que se pretende proteger suponen una oportunidad para redibujar la línea que separa el uso urbano del uso forestal, mitigar los efectos de la sequía en áreas estratégicas de gestión y generar refugios climáticos en áreas residenciales en contacto con el bosque. En España, las zonas urbanas consumen alrededor de 2.212 hectómetros cúbicos (hm³) de agua al año, según los últimos datos disponibles del Instituto Nacional de Estadística (INE) para 2022. Este volumen incluye el consumo doméstico, industrial y otros usos municipales, con un consumo medio de 128 litros por habitante al día(INE)(AEAS).

Desde el primer proyecto de este tipo en España (2018) se ha avanzado mucho en su implantación, si bien el hecho de que solamente haya habido 3 impactos de incendios contra zonas pobladas protegidas mediante esta metodología limita el conocimiento disponible. Este trabajo analiza los 3 incendios acaecidos, y los límites operativos de esta técnica en función de los modelos de combustible y los trabajos selvícolas para delimitar la capacidad de autoprotección de zonas de Interfaz Urbano-Forestal mediante cortafuegos verdes mantenidos con riegos prescritos y agua regenerada.

Palabras clave

Selvicultura ecohidrológica, agua regenerada, autoprotección, planificación de operaciones, ingeniería forestal

1. Introducción

En los últimos años, la creciente frecuencia e intensidad de los incendios forestales en zonas de Interfaz Urbano-Forestal (IUF) se ha convertido en un reto urgente. La expansión de las áreas residenciales hacia zonas forestales, el cambio climático con sequías prolongadas y el aumento de grandes incendios, han acrecentado la vulnerabilidad de estas zonas. Tradicionalmente, la defensa contra incendios en núcleos de población ha descansado en franjas cortafuegos sin vegetación y los medios de extinción, pero la complejidad de la IUF exige un enfoque holístico.

En este contexto, los “cortafuegos verdes” diseñados bajo un enfoque de selvicultura ecohidrológica, y sostenidos mediante riegos prescritos con agua regenerada, está cobrando relevancia (Dalmau et al., 2022). Estos cortafuegos se basan en la utilización de Sistemas de Defensa contra Incendios Forestales (SIDEINFO). La novedad respecto a los cortafuegos clásicos radica en que el aporte de humedad adicional (Blanco et al., 2022), que genera una banda perimetral capaz de rebajar la intensidad del frente de llamas por debajo de la capacidad de extinción (Figura 1).

Conviene recordar que el propósito de usar agua regenerada es doble, al reducir la dependencia de recursos hídricos convencionales y facilitar la autoprotección reduciendo la disponibilidad del combustible forestal con agua limpia posteriormente devuelta al sistema.



Figura 1. Reducción de la temperatura en zona de impacto de incendio forestal contra zona poblada mediante riego prescrito captada a través de cámara en espectro visible e infrarrojo en el Parque Natural de la Devesa del Saler – Albufera de València. Fuente: Bombers de València

Conceptos como “áreas defendibles”, “zonas de ignición de las viviendas” (Barkley et al., 2004) o los “cinturones verdes” (Montgomery, 1973), forman parte de la literatura clásica de incendios forestales. En estos espacios, el diseño de las infraestructuras verdes resulta fundamental y debe realizarse atendiendo a aspectos ecológicos, económicos y silvícolas (Cui, 2018, Figura 3). Desde el punto de vista silvícola se considera la facilidad de establecimiento y gestión, la resistencia a factores como la sequía o las plagas y la capacidad de regeneración post-incendio. Así, en el ámbito Mediterráneo convendría apostar por especies rebrotadoras que recuperen rápidamente su funcionalidad tras un incendio (Figura 2). Finalmente, es crucial seleccionar especies de bajo potencial de generación de combustibles finos muertos (necromasa) y baja inflamabilidad, y promover la biodiversidad. Los riegos prescritos pueden mejorar este factor, pero es crucial utilizar especies con requerimientos hídricos similares para evitar daños, como la proliferación de hongos o el ahogamiento de plantas.

58

September, 1970

Table 1. Recommended Fire-Retardant Plants for Brush Fire Prevention in Hillside Residential Areas

SPECIES	HEIGHT AT MATURITY	DROUGHT TOLERANCE	COLD HARDINESS	EROSION CONTROL			MAINTENANCE
				0-30"	30-60"	60"+	
CATEGORY 1 — GREATEST FIRE RETARDANCE							
Succulents (moisture content 90-95%)							
<i>Carpobrotus edulis</i> (Hottentot Fig)	12-18"	good	to 20° F.	+			medium
<i>Delosperma 'Alba'</i> (White Trailing Ice Plant)	6-8"	very good	to 20° F.	++	+		medium-low
<i>Drosanthemum hispidum</i> (Rosea Ice Plant)	4-6"	good	to 20° F.	++	+		medium-low
<i>Lampranthus spectabilis</i> (Trailing Ice Plant)	6-12"	good	25-30° F.	++	+		medium-low
<i>Malephora crocea</i> (Croceum Ice Plant)	6-12"	good	to 20° F.	++	+		medium-low
<i>Malephora luteola</i> (Yellow Trailing Ice Plant)	6-12"	good	to 20° F.	+			medium-low
<i>Portulacaria afra</i> 'Variegata' (Elephant's Food)	12"	good	25-30° F.	+			medium
<i>Sedum brevifolium</i> (Green Stonecrop)	2-6"	very good	below 20° F.	++	+		medium-low
<i>Sedum confusum</i>	6-12"	very good	25-30° F.	+			medium-low
<i>Sedum rubrotinctum</i> (Brown Bean)	6-8"	very good	to 20° F.	+			medium-low
<i>Senecio serpens</i>	12"	good	to 20° F.	+			medium-low
CATEGORY 2 — Non-succulent plants, high leaf moisture content capacity (80-95%)							
<i>Arctotheca calendula</i> (Cape Weed)	12-15"	fair	20-30° F.	++	+		medium
<i>Gazania uniflora</i> (Trailing Gazania)	6-10"	good	to 20° F.	++	++	++	medium
<i>Osteospermum fruticosum</i> (Trailing South African Daisy)	12-18"	very good	to 20° F.	++	++	++	medium
<i>Pelargonium peltatum</i> (Ivy Geranium)	12"	fair	over 30° F.	++	++	++	medium-high
CATEGORY 3 — Plants with medium-high leaf moisture content capacity (70-80%)							
<i>Ajuga reptans</i> (Giant Ajuga)	6-9"	poor	below 20° F.	+			high
<i>Atriplex semibacata</i> (Creeping Australian Saltbush)	12"	excellent	to 20° F.	++	++	++	medium
<i>Ceratium tomentosum</i> (Snow-in-Summer)	4-6"	very good	below 20° F.	++	++	++	medium-high
<i>Myoporum parvifolium</i>	6"	very good	to 20° F.	++	++	++	medium-low
<i>Santolina chamaecyparissus</i> (Gray Lavender Cotton)	18-24"	excellent	below 20° F.	++	++	++	high
<i>Santolina virens</i> (Green Lavender Cotton)	18-24"	excellent	below 20° F.	++	++	++	high
<i>Vinca major</i> (Periwinkle)	18-24"	fair	below 20° F.	++	++	++	medium-low
<i>Vinca minor</i> (Dwarf Running Myrtle)	6-12"	fair	below 20° F.	++	++	++	medium-low
CATEGORY 4 — LEAST FIRE RETARDANCE Plants with medium leaf moisture content capacity (60-70%)							
<i>Baccharis pilularis</i> var. <i>prostrata</i> (Dwarf Coyote Bush)	12-24"	excellent	below 20° F.	++	++	++	high
<i>Hedera canariensis</i> (Algerian Ivy)	12-15"	poor	25-30° F.	++	++	++	medium
<i>Hedera helix</i> (English Ivy)	12"	poor	below 20° F.	++	++	++	medium
<i>Helianthemum nummularium</i> (Sunrose)	6-8"	very good	20-30° F.	++	++	++	medium-low
<i>Hypericum calycinum</i> (Aaron's Beard)	12-15"	good	below 20° F.	++	+		medium-low
<i>Teucrium chamaedrys</i> (Germander)	8-12"	good	below 20° F.	++	++	++	medium-low
<i>Verbena peruviana</i>	4-6"	very good	below 20° F.	+			medium-low

Figura 2. Plantas retardantes de fuego recomendadas para prevención de incendios forestales en el área residencial de Hillside (Los Ángeles). Fuente: Montgomery, 1970

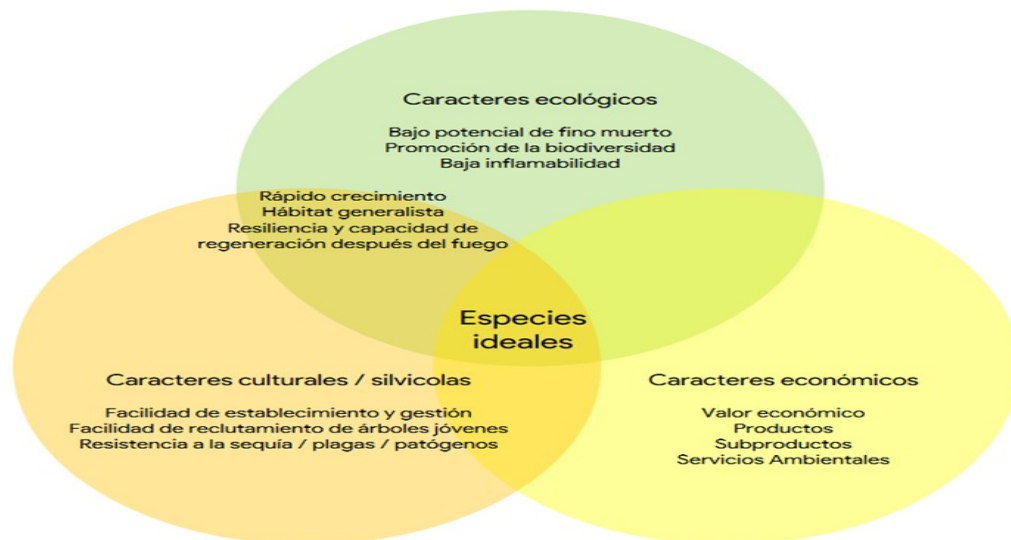


Figura 3. Selección de especies ideales para la creación de cortafuegos verdes en entornos de I-UF. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Cui et al, 2018

De la conjunción de todas estas características se obtiene un catálogo de especies ideales para creación de cortafuegos verdes aplicados a zonas de I-UF. Esta selección, junto con la gestión forestal, los riegos prescritos con agua procedente de la propia zona urbana a proteger, la formación en protección civil y las redes sensoriales inalámbricas que monitorizan el riesgo en tiempo real y permiten la activación en caso de emergencia, hace que este tipo de inversiones resulten altamente rentables. Se estima que una inversión de 5 millones de euros en estos sistemas genera un retorno de más de 30 millones de euros (Hernández et al., 2022).

Sin embargo, surge una pregunta crítica: ¿cuál es el límite cuantitativo de operación de estos sistemas?. En la actualidad no existe una normativa que regule este tipo de infraestructuras contra incendios forestales y cuantifique su capacidad para sostener un impacto, al contrario de lo que sucede en el ámbito de los



incendios urbanos, cuyas BIE, redes de rociadores, materiales aditivos... están perfectamente normalizadas en textos basados en ensayos y experiencias reales. En el ámbito de las infraestructuras forestales existen normas o reglamentos que establecen anchuras, fracciones de cabida cubierta o densidades, pero no necesariamente atienden a cuestiones operativas o han sido validados con ensayos o simulaciones. Eso lleva a que en muchos casos las infraestructuras defensivas se diseñen en base al “mínimo legal exigible” y no a criterios de funcionalidad cuantificables.

2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es identificar y describir los límites operativos de los riegos prescritos en la defensa contra incendios en áreas IUF mediante cortafuegos verdes basados en los sistemas SIDEINFO. los objetivos específicos son:

- Desarrollar una herramienta de cálculo integrada en la plataforma digital de control que permite el cálculo de la capacidad operativa del sistema.
- Analizar los tres incendios documentados en los que se activaron SIDEINFO para la defensa de zonas residenciales, describiendo la eficacia del sistema.
- Analizar y cuantificar las capacidades de cada instalación SIDEINFO llevada a cabo hasta la fecha.
- Determinar los Volúmenes de Agua Movilizables necesarios para una defensa efectiva de las zonas de I-UF en función de los diferentes modelos de combustible de uso común en materia de incendios forestales.
- Determinar los principales factores condicionantes del rendimiento de la defensa con riegos prescritos, tales como la velocidad de propagación, la intensidad de fuego, la capacidad de aporte hídrico o la gestión previa del combustible.
- Proponer un conjunto de parámetros de diseño y protocolos de activación que se ajusten a las limitaciones reales de caudal, disponibilidad de agua, topografía y tipos de vegetación presentes en la zona de interfaz.

Con estos objetivos, se espera obtener una referencia técnica y operativa que oriente la creación de un estándar normalizado en la implementación de franjas defendibles con riegos prescritos. Esto permitirá compatibilizar la seguridad de las unidades intervinientes, las personas y bienes y el medio natural con la eficiencia en el uso de los recursos hídricos.

3. Metodología

La metodología para el desarrollo de la herramienta de cálculo de SIDEINFO se basó en el trabajo técnico de un equipo multidisciplinar con amplia experiencia en defensa contra incendios forestales en la I-UF.

El primer paso para la determinación del Límite Operativo del Sistema SIDEINFO consistió en seleccionar los Modelos de Combustible para los cálculos, optando por los modelos de Rothermel y los de Scott y Burgan, ampliamente aceptados y utilizados en los sistemas de simulación de incendios. El segundo paso implicó la simulación comparativa de incendios bajo diferentes escenarios de estado del combustible, tanto antes como después de la intervención (Figuras 4 y 5). La simulación comparativa permite además identificar puntos críticos, como zonas de entrada de fuego a núcleos poblacionales. Para evaluar la propagación del fuego por dentro del núcleo se asignan valores de combustible a los recintos interiores basados en datos de campo. Estas simulaciones permiten desarrollar escenarios predictivos usados para el diseño del SIDEINFO. Finalmente, también se han llevado a cabo simulaciones físicas mediante maquetas para validar las

hipótesis iniciales (Figura 6).

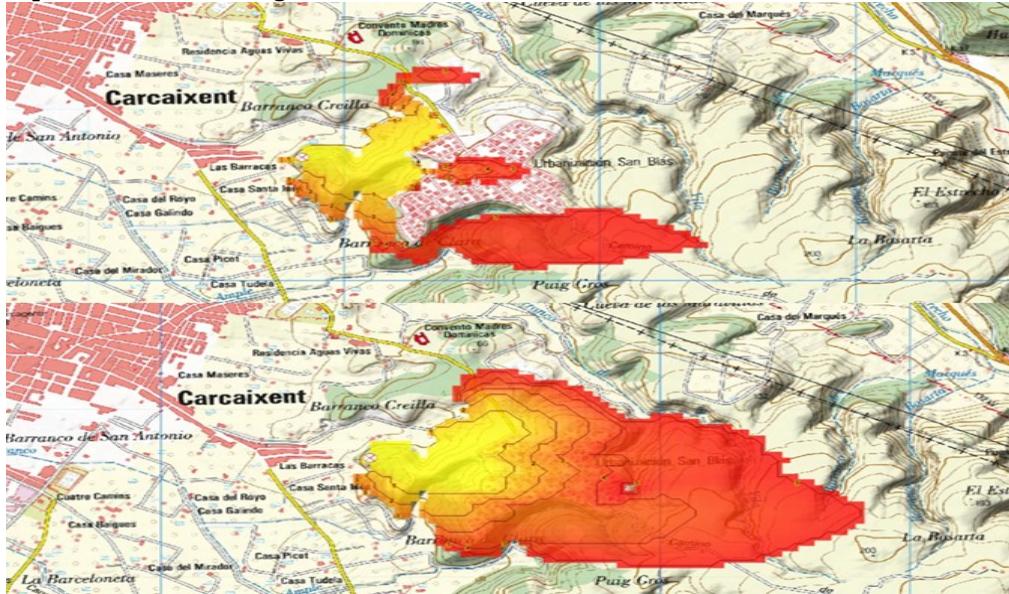


Figura 4. Simulación comparativa modificando únicamente la franja de impacto de un incendio sobre la urbanización San Blas en Carcaixent (València). Condiciones de simulación: Viento W de 20 km/h, temperatura de 40°C y humedad relativa del 30%. Ajustes sobre la capa de modelos de combustible modificando estructuras silvícolas y contenidos de humedad tanto del vivo como del fino muerto. Fuente: Elaboración propia

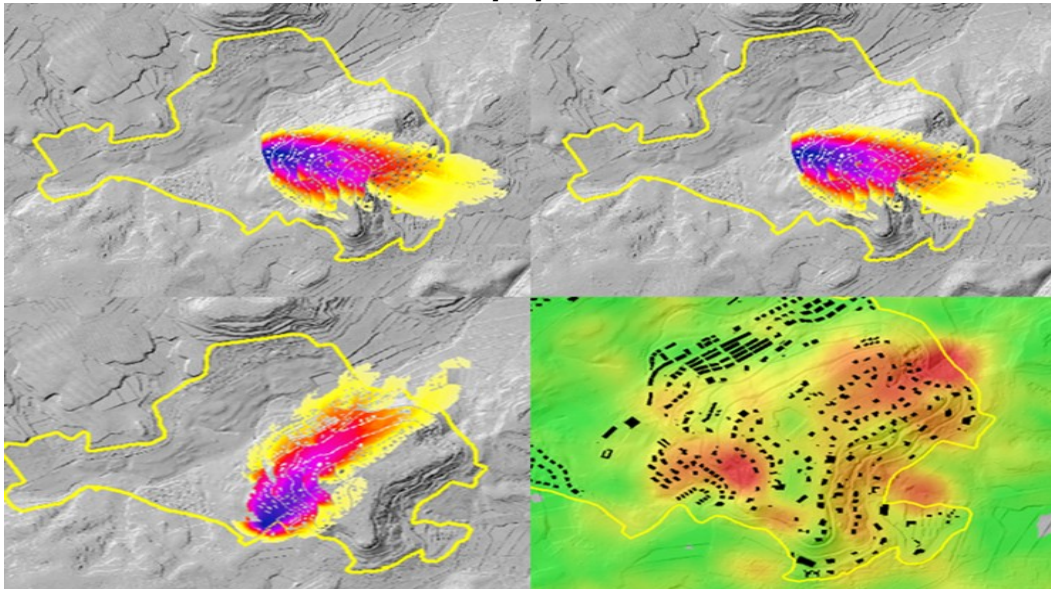


Figura 5. Simulaciones comparativas para diseño de escenarios predictivos y estrategias defensivas de una zona de I-UF bajo diferentes condiciones.

Identificación de zonas de paveseo potencial en el interior del núcleo de I-UF.

Fuente: Medi XXI GSA, 2018.



Figura 6. Simulación física a escala del impacto contra cortafuegos verde alrededor de una zona de I-UF de un frente de llama consolidado. Se combina vegetación viva y vegetación muerta. Para replicar el efecto de los riegos de ensanche se utilizaron atomizadores de agua con aditivos y sin aditivos. Fuente: Medi XXI GSA, 2019

En base a esto, se determina el umbral de incendio que puede impactar contra la zona de I-UF a defender y el límite operativo óptimo del SIDEINFO, basado en su capacidad para reducir la intensidad del fuego. Como premisa de cálculo, el sistema debe ser capaz de defender la línea durante mínimo 1 hora, proporcionando margen a la movilización de los servicios de emergencia. De hecho, su inmediatez de activación implica que en muchas ocasiones el sistema sea la primera respuesta (Figura 7).



Figura 7. Vuelo de reconocimiento en el incendio forestal de Riba-roja del Túria de 25 de abril de 2024 en el que aprecia el SIDEINFO de Masía Traver aportando agua desde las 19:27h. Activación 17 minutos antes de la llegada del primer medio aéreo. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Ayto de Riba-Roja, Comunidad de propietarios de Masía Traver y Generalitat Valenciana.

Los riegos prescritos pretenden incidir sobre la tasa de transferencia de calor,

representada por la expresión dQ/dt y medida en kJ/s, equivalente a los kW comúnmente usados para definir la Intensidad Lineal (kW/m) o el calor por unidad de superficie (kW/m²).

De los elementos que definen el Tetraedro del Comportamiento del fuego (i.e., meteorología, topografía y combustible, Molina et al., 2010) el SIDEINFO puede modificar aspectos locales de la meteorología (humedad Relativa o Temperatura) y del combustible (contenido en humedad y disponibilidad). Además, un aporte eficiente de agua puede influir en el paveso, reduciendo la generación de igniciones secundarias y limitando la capacidad de percolación del fuego al interior del núcleo.

El Calor por Unidad de Superficie depende de la Humedad de Combustible (vivo y muerto), de su tipología (ligero, pesado), su distribución espacial (horizontal y vertical) y su compactación (Molina et al, 2010) y se transfiere mediante conducción, convección y radiación. El aporte de agua busca mitigar estos modos de transferencia desde la zona forestal hacia el área urbana.

La intensidad lineal se calcula mediante la ecuación de Byram (1959), que relaciona el calor de combustión (kJ/kg), el peso del combustible consumido por unidad de área (kg/m²) y la tasa de propagación (m/s). *Rothermel & Deeming* (1980) adaptaron esta ecuación para calcular la intensidad en función de la longitud de la llama, proponiendo una simplificación para facilitar su evaluación en campo [1].

$$I = 258 \times FL^{2.17} \text{ (Byram, 1959)}$$



Donde I es la intensidad del fuego (kW/m) y FL es la longitud de la llama (metros). Dado que 1 litro de agua puede absorber 614 kcal (equivalente a 2570,8 kJ o 2570,8 kW·s, considerando que 1 kcal = 4,187 kJ), se concluye que 1 litro de agua puede absorber 2571 kJ/l (redondeado para cálculos). Para calcular la capacidad de un aporte hídrico (denominado Riego prescrito, R_p , expresado en caudal de l/s) para reducir la intensidad del fuego, se propone la siguiente expresión [2]:

$$\delta I = (258 \times FL^{2.17}) - (R_p \times 2571) \text{ (Dalmau & Domínguez, 2019)}$$

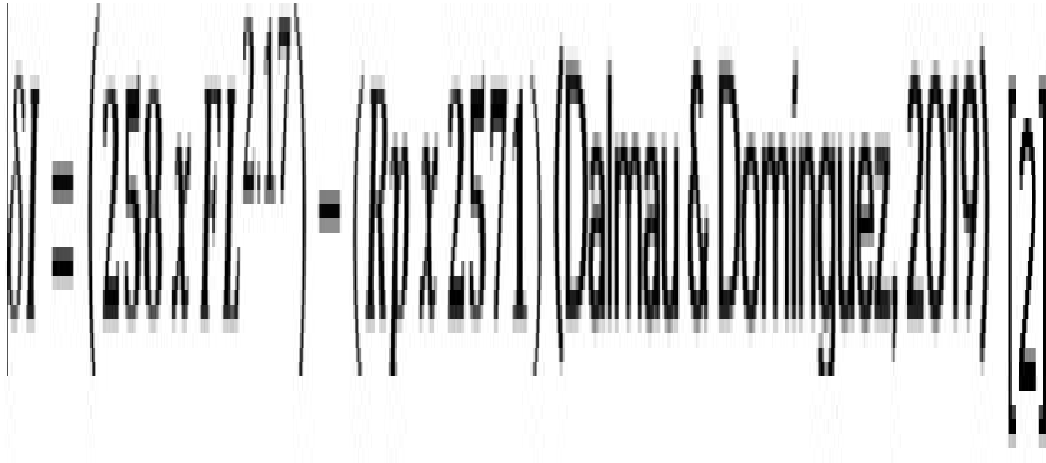


Tabla 1. Valores promedios de concentración de descarga de medios aéreos para conseguir efectividad en función del modelo de combustible. Fuente: González Barrios, 2004

Modelo de combustible	Dosis requerida en litros / m ²
1	0,4074
2	0,4074
3	1,2222
4	1,6269
5	1,2222
6	2,4405
7	2,6571
8	0,8148
9	0,8148
10	1,6296
11	1,2222
12	2,8519
13	2,8519

A pesar de los cálculos teóricos, el límite operativo del SIDEINFO se ha determinado mediante pruebas de funcionamiento y monitoreo de resultados con ensayos de campo, detallados en la sección de resultados. Para cuantificar el Riego prescrito (Rp) óptimo necesario para actuar sobre un metro lineal se propone la siguiente expresión [3]:

$$Rp = \frac{(258 \times FL^{2.17})}{2571} \text{ (Dalmau \& Domínguez, 2019)}$$

$$Rp = \frac{(258 \times FL^{2.17})}{2571} \text{ (Dalmau \& Domínguez, 2019) [3]}$$

En esta expresión, el valor 2571 no es adimensional; se expresa en kJ/l y representa la capacidad de absorción de calor por litro de agua. Otro parámetro relevante en incendios forestales es la potencia radiativa o flujo de calor (Q), calculada mediante la ley de Stefan-Boltzmann. Esta ley establece que Q es proporcional a la emisividad (ε), la constante de Stefan-Boltzmann (σ), el área (As, en este caso, la longitud de la llama) y la temperatura (Ts), según la siguiente

fórmula [4]:

$$Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_s \cdot T_s^4$$

$$Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_s \cdot T_s^4 \quad [4]$$

Como ya se ha comentado, la intensidad del fuego de superficie se puede estimar por distintos métodos. El más aceptado es el uso de la fórmula de Byram (1959), ecuación que relaciona la intensidad lineal del frente de fuego (I, medida en kW/m) con la velocidad de dicho frente (*Rate of Spread ROS* en m/min), la biomasa del combustible consumido (W medido en Kg/m²) y el poder calorífico de la vegetación (*Heat of combustion*, H medido en MJ/Kg) [5]:

$$I = H \cdot W \cdot ROS$$

$$I = H \cdot W \cdot ROS \quad [5]$$

Donde, la intensidad (I) es función de la cantidad de calor emitido (H), la tasa de combustión (W) y de la velocidad de propagación (ROS). A ambas expresiones se les añadiría el segundo término propuesto para determinar la efectividad del aporte de agua quedando la siguiente expresión de diferencial de impacto [6,7]:

$$\delta Q = (\varepsilon \cdot \sigma \cdot A_s \cdot T_s^4) - (Rp \cdot 2571) \quad (\text{Dalmau \& Domínguez, 2019}) \quad [6]$$



$$\delta Q = (\varepsilon \cdot \sigma \cdot A_s \cdot T_s^4) - (Rp \cdot 2571) \quad (\text{Dalmau \& Domínguez, 2019})$$

$$\delta I = (H \cdot W \cdot ROS) - (Rp \cdot 2571) \quad (\text{Dalmau \& Domínguez, 2019})$$

Cada torre del sistema SIDEINFO® aporta aproximadamente 1.000 litros/minuto (16,66 l/s) sobre un área circular de 50 metros de radio, cubriendo 7.853,98 m². Esto equivale a un volumen de agua de 2,12 x 10⁻³ l/s·m², 0,1272 l/min·m² o 7,362 l/h·m². Dado que 1 litro de agua absorbe 2.570 kJ (kW·s), para evaporar el agua emitida durante una hora antes del impacto se necesitarían 19.620 kJ/m². Transformando estas unidades, se obtiene que, por cada segundo de operación, el sistema puede absorber 5,45 kW/m² de energía del ambiente de fuego. Por minuto, esto equivale a una reducción de 327 kW/m² en el potencial radiativo. Sin embargo, parte del agua puede perderse por infiltración, lo que debe considerarse en los cálculos.

Esta formulación es orientativa, ya que simplifica una realidad más compleja que requiere validación experimental. Por ejemplo, para cada gramo de biomasa que arde, se requieren 7 gramos de agua (FUEGOLab, 2019). En un modelo de combustible de 20-30 ton/ha, el volumen de agua necesario sería considerable, y deben tenerse en cuenta otros factores adicionales.

Para validar la hipótesis, se busca homologar esta herramienta con métodos ampliamente utilizados, como los medios aéreos. En operaciones aéreas, la concentración de agua necesaria depende del comportamiento del fuego y las estrategias de combate (extinción directa, contención, líneas húmedas, etc.). La densidad de descarga puede expresarse mediante la siguiente fórmula (González Barrios et al., 2004)[8]:

$$D_r = k \cdot F_i \cdot (C_r)^{0,5}$$

$$D_r = k \cdot F_i \cdot (C_r)^{0,5} \quad [8]$$

Donde, D_r es la densidad del agua en litros/m², K es el coeficiente de densidad del combustible forestal, F_i es el índice de propagación del fuego en el incendio, y C_r es un parámetro relativo a la combustibilidad. El Coeficiente de densidad (K), el parámetro relativo a la combustibilidad (C_r) y la carga de combustibles (W) en función de la clasificación *Behave* de modelos de combustible pueden tomar como referencia los valores expresados en la Tabla 2:

Tabla 2. Valores para la carga de combustibles (W), su coeficiente de densidad (K) y el parámetro relativo a la combustibilidad (Cr) para cálculo de densidad de descarga (Dr). Fuente: González Barrios, et al, 2004

Modelo de combustible	W (kg/m ²)	Cr	K
1	0,16	1	0,010
2	0,89	0,7	0,056
3	0,67	0,8	0,042
4	3,59	0,9	0,224
5	0,78	0,3	0,049
6	1,35	0,6	0,084
7	1,09	0,5	0,068
8	1,12	0,1	0,070
9	0,77	0,4	0,048
10	2,69	0,2	0,168
11	2,58	0,15	0,161
12	7,74	0,12	0,484
13	13,01	0,1	0,813

Según las mismas fuentes (González Barrios, et al, 2004) el índice de propagación se determina mediante la integración de la velocidad de propagación, el parámetro de combustibilidad (C_r) y la velocidad del viento (V_{viento}) que también afectará a las “descargas” mediante riegos prescritos en forma de derivas, haciendo uso de la siguientes expresiones:

$$F_i = [V_p / 0,35]^{(\frac{1}{1,25 C_r})}$$

$$F_i = [V_p / 0,35]^{(\frac{1}{1,25 C_r})} \quad [9]$$

Aplicable en aquellos casos en los que la velocidad del viento sea inferior a

15km/h [9] y

$$F_i = \left[V_p / 1,2 \cdot \left[1 - \exp \left[\frac{\left(\left(\frac{V_{viento}}{1,6} \right) + 1,5 \right)^2}{240} \right] \right] \right]^{\left(\frac{1}{1,25 C_r} \right)}$$

$$F_i = \left[V_p / 1,2 \cdot \left[1 - \exp \left[\frac{\left(\left(\frac{V_{viento}}{1,6} \right) + 1,5 \right)^2}{240} \right] \right] \right]^{\left(\frac{1}{1,25 C_r} \right)} \quad [10]$$

Aplicable en aquellos casos en los que la velocidad del viento sea superior a 15 Km/h [10]. A partir de este cálculo y conocidas las relaciones entre la Intensidad lineal del frente de llama (I) y la Longitud de llama (L), así como entre la Intensidad, el calor combustión (Q), la velocidad de propagación (Vp) y la carga de combustible (W) [12], expresadas de la siguiente forma (González Barrios, et al, 2004)[11]:

$$I = \left(\frac{L}{0,0775} \right)^{\frac{1}{0,46}}$$

$$I = \left(\frac{L}{0,0775} \right)^{\frac{1}{0,46}} \quad [11]$$

Que es una forma diferente de formulación de Byram (1959), e:

$$I = W \cdot V_p \cdot Q$$

$$I = W \cdot V_p \cdot Q \quad [12]$$

Se puede llegar a expresar la densidad de agua por unidad de superficie y modelo de combustible que se debe aportar para una efectividad de las operaciones [13,14]:

$$D_r = k \cdot (C_r)^{0,5} \cdot \left[\frac{\left(\left(\frac{L}{0,0775} \right)^{\frac{1}{0,46}} \right)}{0,35 \cdot W \cdot Q} \right]^{\left(\frac{1}{1,25 C_r} \right)}$$

$$D_r = k \cdot (C_r)^{0,5} \cdot \left[\frac{\left(\left(\frac{L}{0,0775} \right)^{\frac{1}{0,46}} \right)}{0,35 \cdot W \cdot Q} \right]^{\left(\frac{1}{1,25 C_r} \right)} \quad [13]$$

Para velocidades de viento inferiores a 15 km/h [13] y

$$D_r = k \cdot (C_r)^{0,5} \cdot \left[\frac{((\frac{L}{0,0775})^{0,46})}{1,2 \cdot W \cdot Q \cdot \left[1 - \exp \left[\left(\frac{V_{viento}}{1,6} \right)^2 + 1,5 \right] \cdot 240 \right]} \right]^{\left(\frac{1}{1,25 C_r} \right)}$$

Tabla 3. Valores promedios de concentración de descarga de medios aéreos para conseguir efectividad en función del modelo de combustible. Fuente: González Barrios, 2004

Modelo de combustible	Dosis requerida en litros / m ²
1	0,4074
2	0,4074
3	1,2222
4	1,6269
5	1,2222
6	2,4405
7	2,6571
8	0,8148
9	0,8148
10	1,6296
11	1,2222
12	2,8519
13	2,8519

Las necesidades de cobertura de combustibles pueden ajustarse a valores superiores o inferiores, dependiendo de la intensidad del incendio forestal en curso. Sabiendo que 1 kg de agua puede absorber 614 kcal (calor sensible más calor latente), los especialistas en medios aéreos pueden realizar ajustes basados en el calor liberado por unidad de área en el frente de avance del incendio. Esto permite determinar los litros de agua necesarios por cada kcal/m², combinando esta información con la velocidad de propagación para planificar de manera racional y científica el número y tipo de medios aéreos requeridos, considerando su velocidad de crucero, capacidad de descarga y frecuencia media de descargas (González Barrios et al., 2004).

Estos datos también son útiles para los riegos prescritos, ya que, aunque difieren conceptualmente de las descargas aéreas, generan una zona húmeda localizada que amortigua el impacto del fuego. A diferencia de los medios aéreos, los riegos prescritos no dependen de la altura de descarga, tienen un efecto de deriva similar y pueden operar de noche. Durante el día, permiten liberar medios aéreos para otras operaciones, y en general, ofrecen una mayor cadencia de descarga. Además, evitan exponer a los pilotos a entornos de vuelo complejos, como áreas con infraestructuras eléctricas o antenas, y reducen el riesgo de daños a edificaciones, como roturas de ventanas, caída de muros o desprendimientos, que pueden ocurrir con descargas aéreas.

Según los datos recopilados por González Barrios et al. (2004), las dosis de descarga necesarias en función del calor liberado por el incendio se expresan en la

Tabla 4:

Tabla 4. Litros requeridos por m² en función del calor liberado por el frente. Fuente: Elaboración propia a partir de González Barrios, et al 2004

Calor liberado (kcal/m ²)	Equivalencia en kW/m ²	Litros requeridos por m ²
100	0,4187	0,162
500	2,093	0,814
1.000	4,187	1,628
1.500	6,280	2,442
2.000	8,374	3,257
2.500	10,467	4,071
3.000	12,561	4,885
3.500	14,654	5,712
4.000	16,748	6,514
4.500	18,841	7,328
5.000	20,935	8,143
5.500	23,028	8,957
6.000	25,122	9,771
6.500	27,215	10,586
7.000	29,309	11,411
7.500	31,402	12,214
8.000	33,496	13,029

3.1. Hoja de cálculo del número de pasadas para extinción teórica

La primera versión desarrollada consiste en una hoja de cálculo que permite modificar los parámetros de entrada (caudal, tiempo de giro, ángulo de rotación, modelo de combustible...) y a partir de esa información estima el calor que generará el frente y las pasadas necesarias para una extinción teórica (Figuras 8 y 9). Esta metodología permite inferir el tiempo de operación requerido (antelación en la activación del sistema) en función del modelo de combustible, y comprobar las diferencias una vez se ha desarrollado el trabajo silvícola asociado.

CÁLCULO DEL LÍMITE OPERACIONAL DEL SISTEMA SIDEINFO

Información de partida

Caudal del monitor:	800	litros/min.
Tiempo de rotación:	6	min. * pasada
Radio de acción del sistema:	45	metros
Ángulo de operación:	360	grados
Modelo de combustible principal:	13	

Resultados

Superficie humectada:	6362	m ²
Pluviometría generada:	0,75	l/m ² * pasada
Calor generado por el combustible:	44273	kJ/m ²
Capacidad de absorción de energía:	1940	kW/m ² * pasada
Nº de pasadas necesarias para extinción teórica:	23	pasadas

Figura 8. Cálculo del número de pasadas de un monitor para obtener una extinción teórica de acuerdo al calor generado por metro cuadrado consumido en un modelo 13 de Rothermel. Fuente: Medi XXI GSA

CÁLCULO DEL LÍMITE OPERACIONAL DEL SISTEMA SIDEINFO		
Información de partida		
Caudal del monitor:	800	litros/min.
Tiempo de rotación:	6	min. * pasada
Radio de acción del sistema:	45	metros
Ángulo de operación:	360	grados
Modelo de combustible principal:	SB-4	
Resultados		
Superficie humectada:	6362	m ²
Pluviometría generada:	0,75	l/m ² * pasada
Calor generado por el combustible:	19800	kJ/m ²
Capacidad de absorción de energía:	1940	kW/m ² * pasada
Nº de pasadas necesarias para extinción teórica:	27	pasadas

Figura 9. Cálculo del número de pasadas de un monitor por un punto determinado para obtener una extinción teórica de acuerdo al calor generado por metro cuadrado consumido en un modelo SB-4 de Scott y Burgan. Fuente: Medi XXI GSA

3.2. Análisis de incendios reales en zonas con SIDEINFO

Desde la puesta en marcha de esta metodología de trabajo se han llevado a cabo un total de 8 instalaciones fijas:

- SIDEINFO Santa Marina
- SIDEINFO San Blas
- SIDEINFO El Vedat
- SIDEINFO Masía Traver
- SIDEINFO Els Pous
- SIDEINFO Cañada Norte
- SIDEINFO Cañada Sur
- SIDEINFO El Saler

Y se han suministrado más de 160 unidades portátiles a diferentes operativos:

- Cabildo de Gran Canaria
- Bombers de la Generalitat de Catalunya
- Cabildo de La Palma
- Cabildo de La Gomera
- Cabildo de Tenerife
- Bombers de València
- Bomberos de Málaga
- Unidad Militar de Emergencias
- Protecció Civil de Xàbia
- Protecció Civil de Nàquera
- Protecció Civil de Carcaixent
- Protecció Civil d'Alzira
- Empresas privadas

Este proceso ha permitido recopilar feedback de los operativos implicados, refinando la metodología de cálculo y desarrollando herramientas funcionales para el personal técnico. Se han creado ábacos de cálculo para instalaciones fijas y

portátiles, inicialmente centrados en parámetros hidráulicos, pero evolucionando hacia el cálculo del límite operativo para mejorar la seguridad del personal. Es importante destacar que esta metodología no se concibe como una herramienta de extinción, sino como una medida defensiva, diseñada para enfrentar incendios extremos que superan la capacidad de los dispositivos profesionales y pueden causar daños significativos.

En el diseño de las instalaciones fijas, se han considerado umbrales de protección como 7 kW/m^2 (límite para equipos de protección individual de bomberos forestales) y 20 kW/m^2 (máxima radiación tolerable para acristalamientos), como se muestra en la Tabla 5:

Tabla 5. Efectos de la radiación calórica incidente asociada al daño esperable para diversos flujos térmicos y clasificación de riesgo propuesta. Fuente: Elaboración propia a partir de Manual de Ingeniería de riesgos. Norma PDSVA IR-S-02.

kW/m ²	EFFECTOS DE LA RADIACIÓN CALÓRICA INCIDENTE	RIESGO
1,39	Piel humana puede estar expuesta un periodo largo de tiempo sin presentar efectos adversos. <i>Bruttner (1951)</i>	Bajo
1,5	Máximo soportable para personas con vestimenta normal y un tiempo prolongado	
2,5	Dolor después de 40 segundos de exposición (sin protección)	
4	Quemaduras de primer grado, suficiente para causar dolor si la exposición es mayor de 20 segundos	Moderado
5	Quemaduras de segundo grado en la piel después de una exposición de 30 segundos. <i>Stoll and Greene (1959)</i>	
7	Exposición máxima con protección completa (EPI) para un periodo de 90 segundos	Alto
8	Umbral de mortalidad en un tiempo de exposición de 1 minuto	
10	Dolor después de 3 segundos de exposición (sin protección)	
12	Fusión de los plásticos y elementos de fachada. <i>Gelderblom (1980)</i>	
13,5	Energía mínima para dañar materiales de bajo punto de fusión (aluminio, soldaduras...)	
20	Máxima radiación incidente tolerable de los acristalamientos	Muy Alto
22,1	Límite de exposición segura de los depósitos de almacenamiento de GLP. <i>Martinsen, Johnson, and Millsap (1989)</i>	
31,5	Estructuras de madera toman espontáneamente (exposición 15-20 min). <i>U.S. Department of Housing and Urban Development (HUD)</i>	
37,5	100% de mortalidad en 1 minuto	
45	Ignición de madera en 20 segundos	

Para las operaciones, se utiliza una ficha técnica centrada en parámetros hidráulicos, cuyo límite operativo es el Volumen de Agua Movilizable (VAM) de cada unidad. La Figura 10 muestra uno de los ábacos de cálculo utilizados en

campo para diseñar instalaciones defensivas en zonas de IUF, basados en parámetros de caudal y presión.

BOQUILLA		10 mm		12 mm		14 mm		16 mm	
PRESIÓN		51/128"		15/32"		9/16"		5/8"	
BAR	PSI	l/min	Radio (m)	GPH	Radio (ft)	l/min	Radio (m)	GPH	Radio (ft)
2,5	135	21	142	25	194	26	-	-	-
3,6	2140	69	2252	82	3.068	85	-	-	-
3	147	22	9.360	26	212	28	277	31,5	-
44	2.325	72	2.471	85	3.363	92	4.390	103	-
3,5	158	23,5	169	27	229	30	299	33,5	-
51	2.510	77	2.669	89	3.630	98	4.741	110	-
4	170	27,5	180	28	245	31	320	35	-
58	2.690	90	2.851	92	3.886	102	5.074	115	-
4,5	-	-	-	-	-	-	340	36	-
65	-	-	-	-	-	-	5.378	118	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
73	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BOQUILLA		18 mm		20 mm		22 mm		24 mm	
PRESIÓN		11/16"		101/128"		111/128"		121/128"	
BAR	PSI	l/min	Radio (m)	GPH	Radio (ft)	l/min	Radio (m)	GPH	Radio (ft)
2,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
44	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3,5	379	33,5	470	34	610	34,5	717	36,5	-
51	6.006	110	7.445	112	9.660	113	9.660	120	-
4	406	34,5	550	35	657	36,5	767	37,5	-
58	6.423	113	8.710	115	10.400	115	10.400	123	-
4,5	430	36	583	36,5	693	38	810	39	-
65	6.814	118	9.240	120	10.980	120	10.980	128	-
5	454	37,5	617	38,5	735	39,5	858	41	-
73	7.183	123	9.770	123	11.640	126	11.640	135	-

% Solape	Franja solape (m)	Distancia entre torres (m)	Perímetro lineal cubierto (m) para 3 torres	Superficie cubierta sector (m²)	Pluviometría por hora (l/m²)
0%	0,0	52,0	156,00	4.056,00	12,91
10%	2,6	49,4	150,80	3.920,80	13,36
20%	5,2	46,8	145,60	3.785,60	13,84
30%	7,8	44,2	140,40	3.650,40	14,35
40%	10,4	41,6	135,20	3.515,20	14,90
50%	13,0	39,0	130,00	3.380,00	15,50
60%	15,6	36,4	124,80	3.244,80	16,14
70%	18,2	33,8	119,60	3.109,60	16,84
80%	20,8	31,2	114,40	2.974,40	17,61
90%	23,4	28,6	109,20	2.839,20	18,45
100%	26,0	26,0	104,00	2.704,00	19,37

Figura 10. Ábaco de cálculo del rendimiento hidráulico utilizado para el cálculo del límite operativo del SIDEINFO en instalaciones portátiles. Fuente: Medi XXI GSA

Se cuenta con documentación que avala el uso de estos sistemas en 3 incendios (Carcaixent y Riba-roja) que impactaron contra instalaciones fijas, y en 6 incendios donde se desplegaron unidades SIDEINFO portátiles, incluyendo eventos en Portugal, Canarias, Comunitat Valenciana y Catalunya. De cada incidente, se han recopilado y analizado datos en colaboración con los usuarios, evaluando el desempeño, la eficacia observada y las mejoras implementadas en cada iteración de la herramienta de cálculo. El objetivo final se alcanzó con la normalización de una herramienta que integra 20 años de datos y la experiencia acumulada en incendios forestales que afectan a zonas pobladas. Las Figuras 11, 12 y 13 son ejemplos de 3 incendios reales que han contribuido a la metodología de cálculo del límite operativo del SIDEINFO.



Figura 11. Impacto de cabeza de incendio forestal de Riba-roja el 25 de abril de 2024 contra cortafuegos verde de Masía Traver. Contención del impacto. Fuente: Medi XXI

GSA



Figura 12. Impacto de cabeza del incendio de Vallseco de 2019 contra el Parador Nacional de Cruz de Tejada. Despliegue de unidades portátiles y aportación de riegos prescritos en táctica “Preparar y defender”. Fuente: Cabildo de Gran Canaria



Área quemada en alta intensidad
(Consumo completo de las copas)

Transición
Zona 2 – Zona 3

Área influencia riegos prescritos
CORTAFUEGOS VERDE
Sin intervención de bomberos

Figura 13. Sección de impacto de la cabeza del incendio de Carcaixent de 2016 contra el núcleo de población de Santa Marina que había activado 6 horas antes sus riegos prescritos en táctica “Preparar y defender” de su plan de autoprotección. Fuente: Medi XXI GSA

Todos estos casos se basan en datos de campo de intensidad del fuego estimada (kW/m), velocidad de propagación, longitud de llama, caudal de riego aplicado (l/min), tiempo de activación y superficie humectada. Además, se realizaron entrevistas a personal técnico y residentes de las áreas afectadas, registrando la cronología de los hechos, los niveles de coordinación con los bomberos y la percepción del grado de protección.

Con estos datos, se llevó a cabo un análisis comparativo, evaluando aspectos como el modelo de combustible predominante, la orografía, la intensidad del frente, la existencia de gestión forestal previa, el uso de maniobras de fuego

técnico, las características de las instalaciones (fijas o portátiles) y los resultados obtenidos (daños en viviendas, vegetación quemada, éxito o fracaso en el control del fuego). También se identificaron similitudes y diferencias en la activación de los sistemas y la disponibilidad real de agua, considerando limitaciones en las conducciones y el nivel de automatización. Con esta información, se ha desarrollado una herramienta de cálculo normalizada, cuyos resultados se presentan a continuación.

4. Resultados

A partir de la metodología expuesta, se obtuvieron los resultados presentados en la Tabla 6:

Tabla 6. Calor emitido por cada modelo de combustible en condiciones de incendio tipo en uno de los casos analizados mediante Behave y número de pasadas requeridas para la contención del frente de llama. Fuente: Elaboración propia.

Modelos de Combustible	Modelo	Calor (kJ/m ²)	Nº de pasadas para contención
ROTHERMEL	1	1171	1,00
	2	6409	2,00
	3	10231	3,00
	4	36167	10,00
	5	8769	3,00
	6	6452	2,00
	7	5577	2,00
	8	2562	1,00
	9	5097	2,00
	10	17424	5,00
	11	10014	3,00
	12	29989	8,00
	13	44273	12,00
S&B	GR-1	992	1,00
	GR-2	2957	1,00
	GR-3	5375	2,00
	GR-4	5737	2,00
	GR-5	12044	4,00
	GR-6	14981	4,00
	GR-7	20084	6,00
	GR-8	34757	9,00
	GR-9	42816	12,00
	GS-1	3889	2,00
	GS-2	6349	2,00
	GS-3	11704	4,00
	GS-4	50509	13,00
	SH-1	4314	2,00
	SH-2	16559	5,00
	SH-3	6545	2,00
	SH-4	9701	3,00
	SH-5	21423	6,00
	SH-6	21644	6,00
	SH-7	28923	8,00

Modelos de Combustible	Modelo	Calor (kJ/m ³)	Nº de pasadas para contención
	SH-8	27725	8,00
	SH-9	44809	12,00
	TU-1	5226	2,00
	TU-2	5356	2,00
	TU-3	11800	4,00
	TU-4	14536	4,00
	TU-5	34176	9,00
	TL-1	1422	12,00
	TL-2	1989	12,00
	TL-3	2676	12,00
	TL-4	3264	12,00
	TL-5	4765	12,00
	TL-6	6060	12,00
	TL-7	6695	12,00
	TL-8	9467	12,00
	TL-9	13998	12,00
	SB-1	7766	13,00
	SB-2	13795	13,00
	SB-3	18519	13,00
	SB-4	19800	13,00

Tomando como base la ecuación mencionada, en el caso del incendio de Riba-roja en abril de 2024 (Figuras 7, 11 y 17), cada torre del sistema SIDEINFO lanzó 950 l/min, con 8 torres operando durante 17 minutos, lo que resultó en un Volumen de Agua Movilizado (VAM) de 129.200 L antes de la llegada de la primera unidad helitransportada. Cada torre cubre un área circular de 40 metros de radio con un ángulo de giro de 180 grados (media circunferencia), lo que equivale a 2.513,27 m² por torre sin solape. Considerando un solape del 20% entre áreas de humectación, excepto en los extremos de la línea (área deportiva y zona de cultivo), cada torre humedece 2.010,62 m². En total, el sistema cubrió más de 17.000 m² y un frente de 900 metros lineales, con una precipitación de 7,56 l/m² en 17 minutos.

El diseño del SIDEINFO busca emular las descargas de medios aéreos en zonas de IUF, reduciendo derivas y riesgos, y permitiendo operaciones nocturnas. Por ello, las capacidades operativas de los medios aéreos han sido una referencia clave para garantizar la efectividad del sistema. Según los valores promedios de concentración de descarga para modelos de combustible Behave (González Barrios, 2004), en los casos más desfavorables se requieren 2,8519 l/m² para lograr efectividad. En este caso, el aporte del SIDEINFO superó 2,65 veces esta dosis, absorbiendo más energía de la que el fuego generó en el frente lineal y demostrando una eficacia defensiva con un margen de seguridad significativo, incluso en un incendio de impacto rápido (menos de 1 hora).

4.1. Ensayos de campo

El rendimiento del sistema SIDEINFO fue evaluado en campo (Figuras 14, 15 y 16). Se observó un alcance promedio de 40 a 45 metros de radio, según la presión y las pérdidas de carga en las estaciones de bombeo, con un caudal de 850 a 900 L/min según la bomba utilizada. Cada torre protege una superficie media de 5.000-6.300 m², con un giro completo cada 6 minutos en condiciones óptimas. La pluviometría media oscila entre 3 y 5 mm, según la torre y la distancia. Un sector

típico de 6 torres, puede aportar 244,8 m³ en 40 minutos de operación.

No se han registrado impactos en zonas donde se aplicaron retardantes o humectantes para mejorar la eficacia. Las principales limitaciones observadas durante los trabajos de campo estuvieron relacionadas con el viento y los combustibles del interior de las zonas pobladas.



Figura 14. Instalación de higrómetros y pluviómetros bajo la zona de influencia de los riegos prescritos dentro del área de los cortafuegos verdes. Fuente: Universitat Politècnica de València.



Figura 15. Pluviómetros físicos (analógicos) empleados para corroborar y calibrar pluviómetros e higrómetros digitales. Fuente: Medi XXI GSA



Figura 16. Comprobación al milímetro de la precipitación recogida en cada pluviómetro tras los riegos prescritos. Fuente: Medi XXI GSA

4.2. Instalaciones fijas, prevención y desempeño en incendios reales

Hasta la fecha los cortafuegos verdes basados en riegos prescritos alimentados con SIDEINFO en España han recibido el impacto de 3 incendios forestales, mostrando todos ellos resultados satisfactorios, al no haberse producido daños relevantes o viviendas destruidas en las zonas protegidas. Tras analizar los datos y el comportamiento del fuego puede afirmarse que esto se debió al trabajo combinado de los medios de extinción y las infraestructuras preventivas.



Figura 17. Flanco izquierdo del incendio en el Parque Natural del río Túrria el 4 de mayo de 2024 sostenido por el cortafuegos verde y las operaciones terrestres (en rojo) en la urbanización Masía Traver, parque natural del Turia (València). Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Generalitat Valenciana.

Para alcanzar estos resultados, se procesó la información de 164 sensores instalados en campo, que monitorizan parámetros de meteorología, humedad del suelo y otros factores clave para la propagación de incendios forestales. Para evaluar el impacto de los riegos prescritos, se comparó el nivel de riesgo general

(fuera de las zonas humectadas) con el de las áreas con agua prescrita, durante un período de dos años completos (2023 y 2024; Figura 18). Estos datos, recopilados con alta resolución temporal y espacial desde 2022, forman parte del proyecto GUARDIAN.

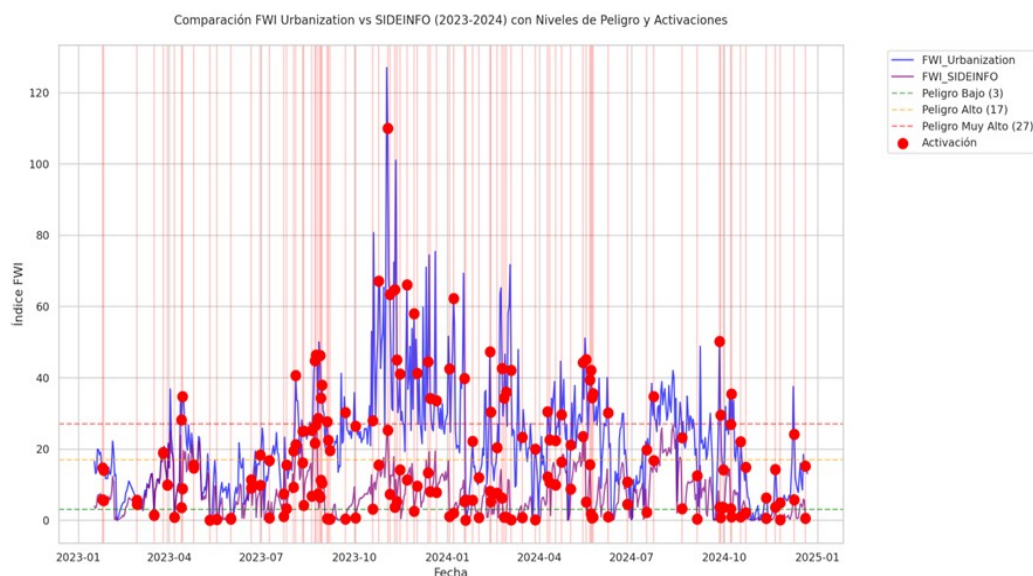


Figura 18. Comparación FWI entre zona humectada (FWI_SIDEINFO) y no humectada (FWI_Urbanization) para el período 2023-2024. Fuente: SIDEINFO NETSense. Medi XXI GSA

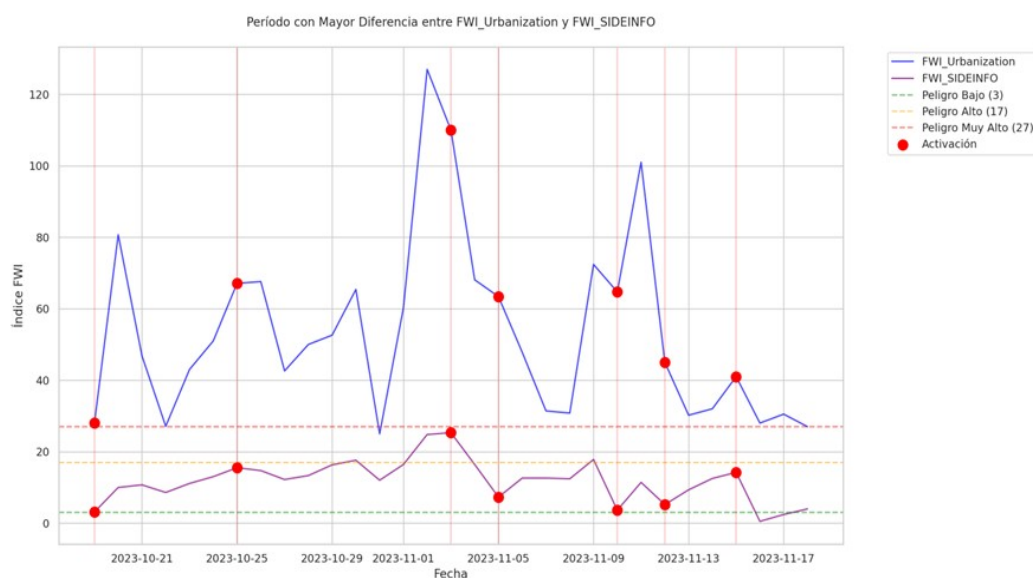


Figura 19. Análisis detallado del periodo con mayor diferencia entre el índice general de la zona, y el del área gestionada con riegos prescritos manteniendo siempre el riesgo por debajo de 27. Fuente: SIDEINFO NETSense. Medi XXI GSA

Durante el período analizado, las diferencias más marcadas se observaron fuera de la temporada estival, específicamente en noviembre de 2023. La Figura 19, correspondiente a este período de 30 días con riesgo muy alto, muestra:

- Mayores discrepancias entre FWI_Urbanization (azul) y FWI_SIDEINFO (morado).
- Eventos de activación (líneas verticales rojas y puntos).
- Umbrales de riesgo establecidos (líneas horizontales).



Las estadísticas durante las activaciones en este período muestran que:

- El FWI_Urbanization alcanzó valores muy altos (media ≈ 60).
- Por el contrario, el FWI_SIDEINFO mantuvo valores más moderados (media ≈ 10.6).
- La diferencia entre ambos índices fue especialmente pronunciada.

Analizando los años 2023 y 2024, se observa que 2024 presenta la mayor influencia de las activaciones en los valores del FWI. El FWI_SIDEINFO tiende a disminuir durante los períodos de activación (puntos rojos), con un promedio de 6.61 sin activación y 4.63 durante las activaciones. En contraste, el FWI_Urbanization mostró un promedio de 20.34 sin activación y 28.10 durante las activaciones. Esto sugiere que las activaciones reducen significativamente el riesgo en las áreas gestionadas, posiblemente debido a la combinación de defensa pasiva (sombreado) y defensa activa (riegos), aunque esto requiere confirmación en futuros ensayos.

La visualización mensual refleja la estacionalidad, con valores más altos en meses cálidos y secos, y más bajos en meses fríos y húmedos. Además, se analizaron períodos de precipitación natural para comparar el comportamiento de la vegetación dentro y fuera del cortafuegos verde. El gráfico siguiente se divide en dos paneles: el panel superior muestra la evolución temporal del FWI.

- Línea azul: FWI_Urbanization
- Línea morada: FWI_SIDEINFO
- Líneas discontinuas horizontales: Umbrales de peligro (verde=3, naranja=17, rojo=27)

El panel inferior muestra la precipitación (PPT) como barras azules. En cuanto al tiempo para alcanzar el umbral de alto peligro ($\text{FWI} > 17$):

- FWI_FWI_Urbanization: 2024-06-02 00:00:00
- FWI_FWI_SIDEINFO: 2024-07-27 00:00:00

Estos resultados confirman la hipótesis: las zonas gestionadas con FWI_SIDEINFO tardan 55 días más en alcanzar el umbral de peligro alto (27 de julio) frente a las no gestionadas (FWI_Urbanization, 2 de junio). Esto se atribuye a que la estructura selvícola de las áreas gestionadas retiene mejor la humedad y minimiza la desecación por viento. El patrón de precipitación (Figura 20) explica las variaciones del FWI, mostrando caídas tras eventos de lluvia y una posterior recuperación en la disponibilidad del combustible para la combustión.

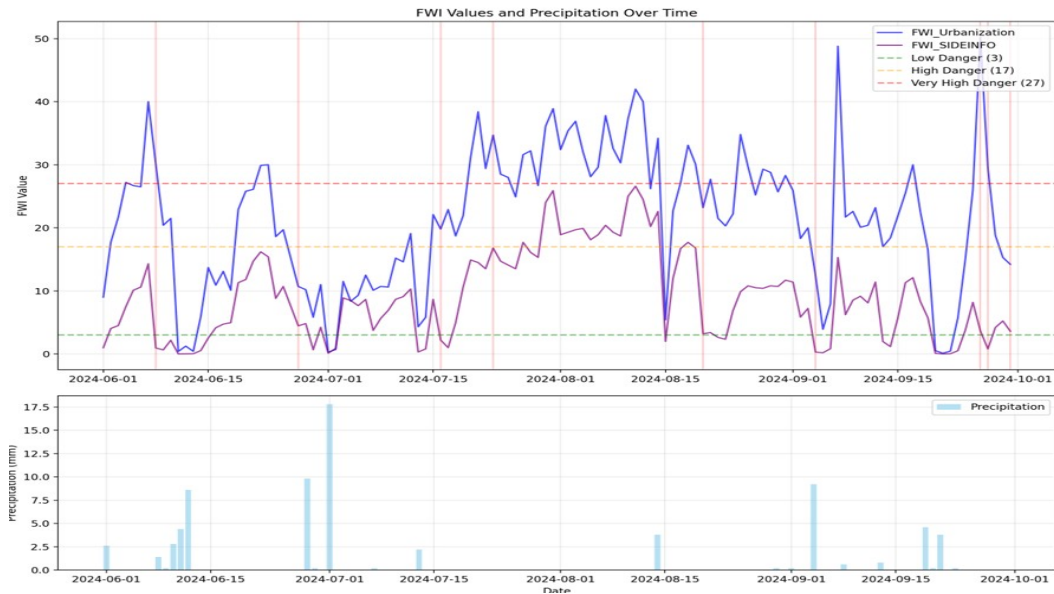


Figura 20. Papel de la precipitación natural en el área gestionada y fuera de ella en términos de evolución del riesgo. Fuente: SIDEINFO NETSense. Medi XXI GSA

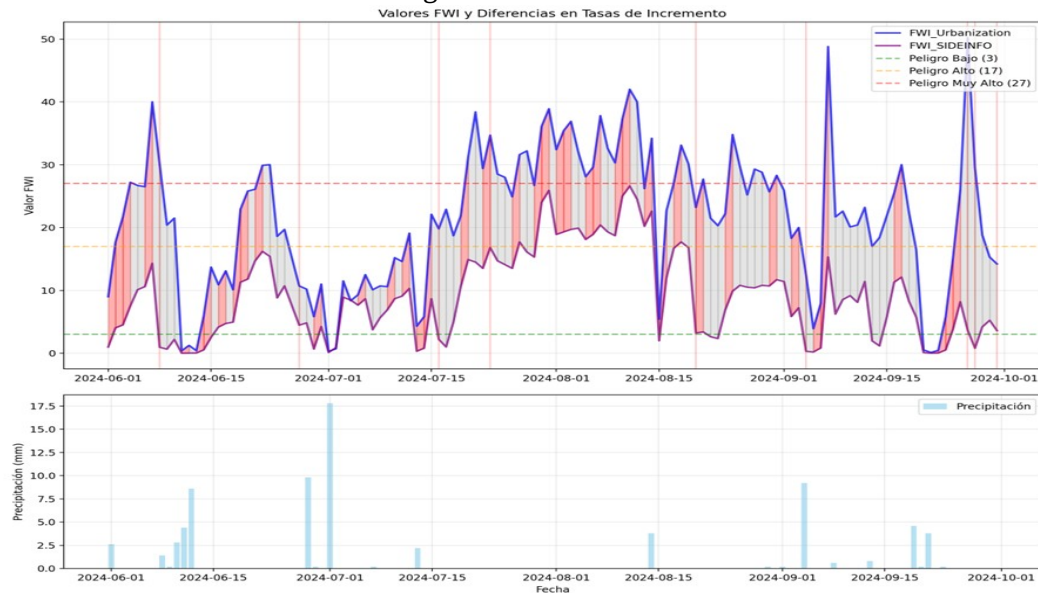


Figura 21. Tasa de reducción del riesgo derivada de la precipitación y diferencia de recuperación de la disponibilidad del combustible en las zonas con tratamientos selvícolas adecuados. Fuente: SIDEINFO NETSense. Medi XXI GSA.

En la Figura 21, el área sombreada entre líneas representa:

- Rojo: Momentos donde FWI_SIDEINFO aumenta más lentamente que FWI_Urbanization
- Gris: Otras diferencias entre las líneas

Las estadísticas muestran una diferencia promedio de 12.51 puntos entre los índices, con una diferencia máxima de 46.54 puntos. Las áreas rojas en el gráfico destacan los períodos en los que el FWI_SIDEINFO aumenta más lentamente que el FWI_Urbanization, confirmando visualmente la hipótesis. Esta divergencia máxima de 46.54 puntos refleja momentos de variación significativa entre ambos índices.

Respecto a la relación entre la precipitación y las diferencias absolutas entre los

índices, atendiendo a la Figura 22, el tamaño y color de los puntos representan la cantidad de lluvia. La correlación negativa (-0.25) sugiere una ligera tendencia a que las diferencias sean menores con mayor precipitación. Estos datos, como NBS (Nature-Based Solutions), permiten inferir y mejorar las políticas de riegos prescritos.

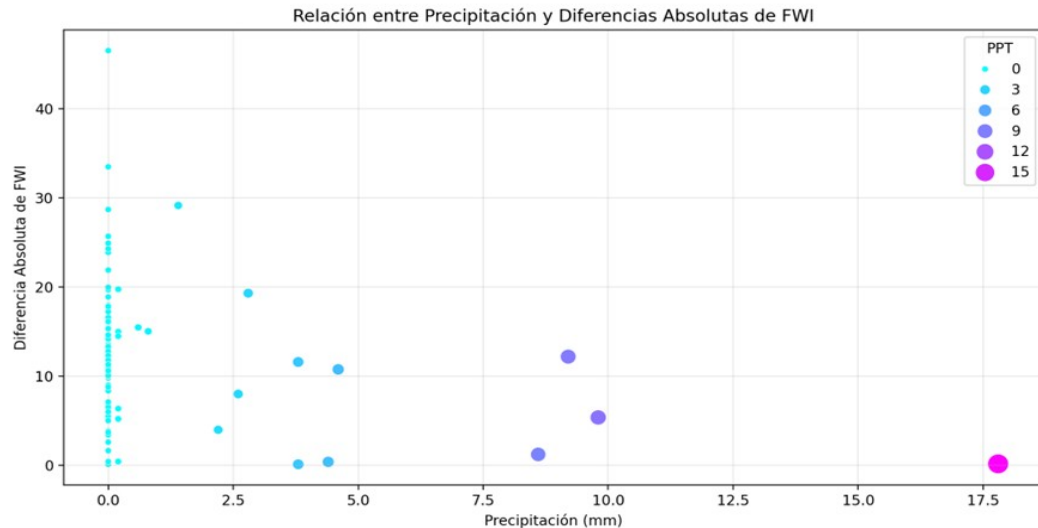


Figura 22. Relación entre cantidad de precipitación y diferencia del FWI. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente se ha procedido a comprobar mediante un climodiagrama de Walter – Gaussen los periodos de sequía en ambas zonas (Figuras 23 y 24). El área en rojo muestra los momentos en los que las masas forestales naturales han estado sometidas a sequía durante el periodo analizado.

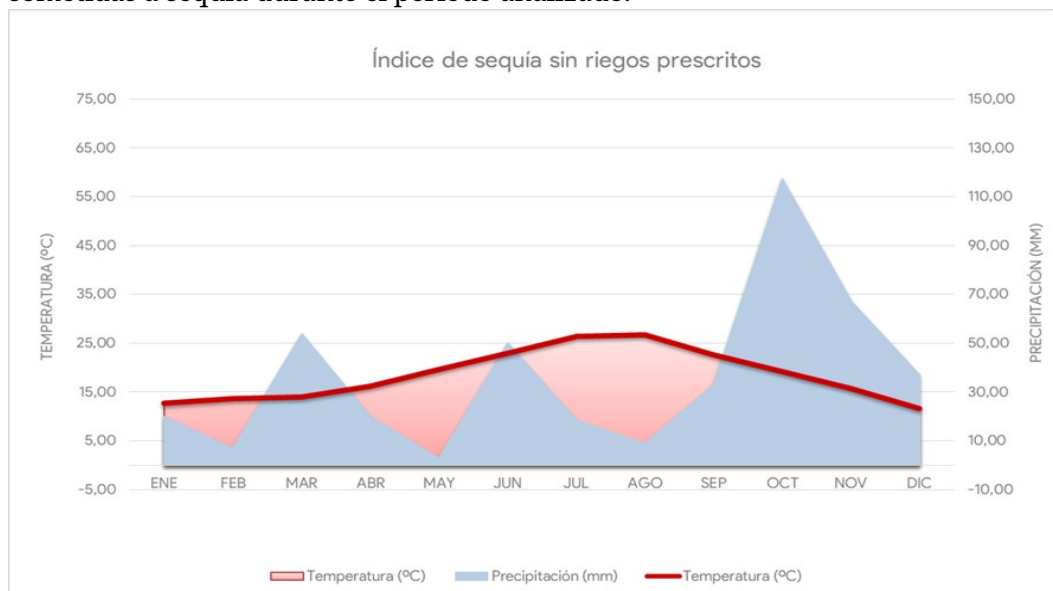


Figura 23. Climodiagrama de Walter – Gaussen con datos reales medidos durante el periodo analizado en zona sin riego. Fuente: Elaboración propia.

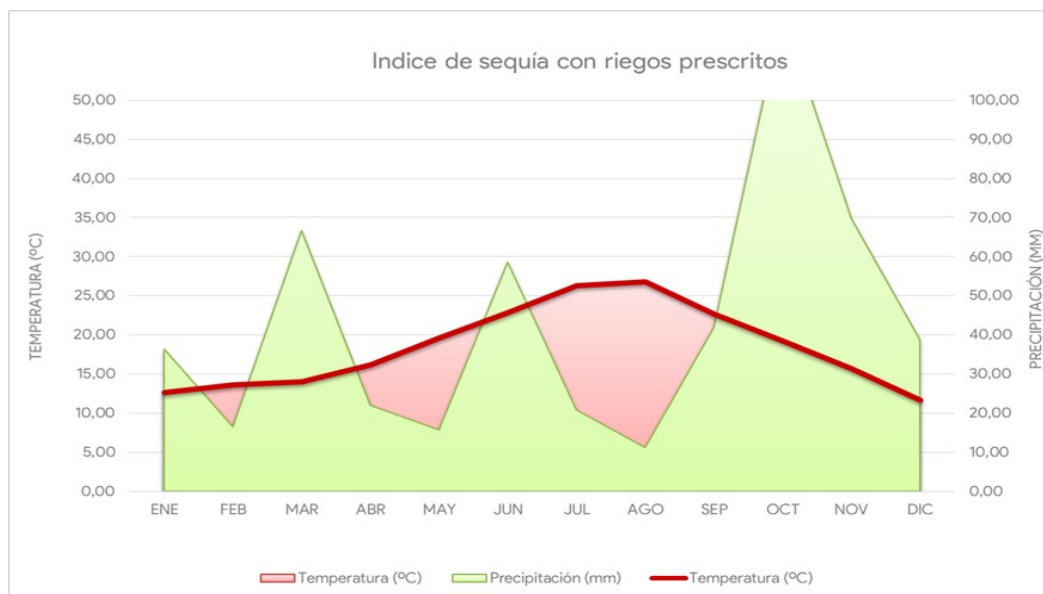


Figura 24. Climodiagrama de Walter – Gaussen con datos reales medidos durante el periodo analizado en zona con riego. Fuente: Elaboración propia.

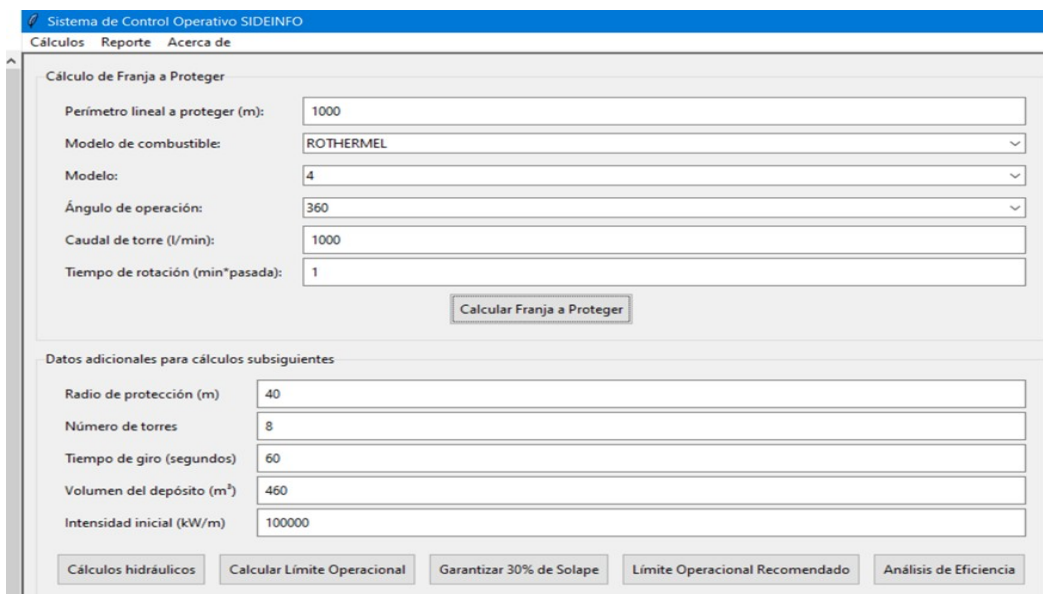
La precipitación aportada en la zona con gestión ha sido de 520 L/m² mientras que el aporte de la precipitación natural ha sido de 436L/m². Cabe recordar que se aplica una restricción de aportes de agua para evitar desarrollo biomásico excesivo según el algoritmo desarrollado por la Universitat Politècnica de València (Dámaso del Campo, A., et al, 2022) atendiendo a criterios de longitud de llama y disponibilidad del combustible.

4.3. Herramienta de cálculo normalizada

El último paso para la obtención del límite operativo cuantitativo del SIDEINFO ha sido compilar todo este conocimiento adquirido en una herramienta donde el usuario aporta los parámetros básicos y el sistema calcula todas las variables (Figuras 25 y 26). Se deben introducir los siguientes datos:

- Perímetro lineal a proteger
- Modelo de combustible (Rothermel y S&B)
- Ángulo de operación
- Caudal deseado por torre
- Tiempo de rotación del monitor

El aplicativo devuelve los cálculos hidráulicos, el límite operacional, la configuración para garantizar un solape del 30% entre torres, si procede, mejoras para alcanzar el límite operacional recomendado, y un análisis de la eficiencia de la instalación. Además, permite generar un reporte en formato editable. Esta información se facilita a los gestores de los riegos prescritos para su implementación.



Sistema de Control Operativo SIDEINFO
Cálculos Reporte Acerca de

Cálculo de Franja a Proteger

Perímetro lineal a proteger (m): 1000
Modelo de combustible: ROTHERMEL
Modelo: 4
Ángulo de operación: 360
Caudal de torre (l/min): 1000
Tiempo de rotación (min/pasada): 1

Datos adicionales para cálculos subsecuentes

Radio de protección (m): 40
Número de torres: 8
Tiempo de giro (segundos): 60
Volumen del depósito (m³): 460
Intensidad inicial (kW/m): 100000

Cálculos hidráulicos **Calcular Límite Operacional** **Garantizar 30% de Solape** **Límite Operacional Recomendado** **Análisis de Eficiencia**

Figura 25. Ejemplo de cálculo del límite operativo de una instalación SIDEINFO.
Fuente: Medi XXI GSA

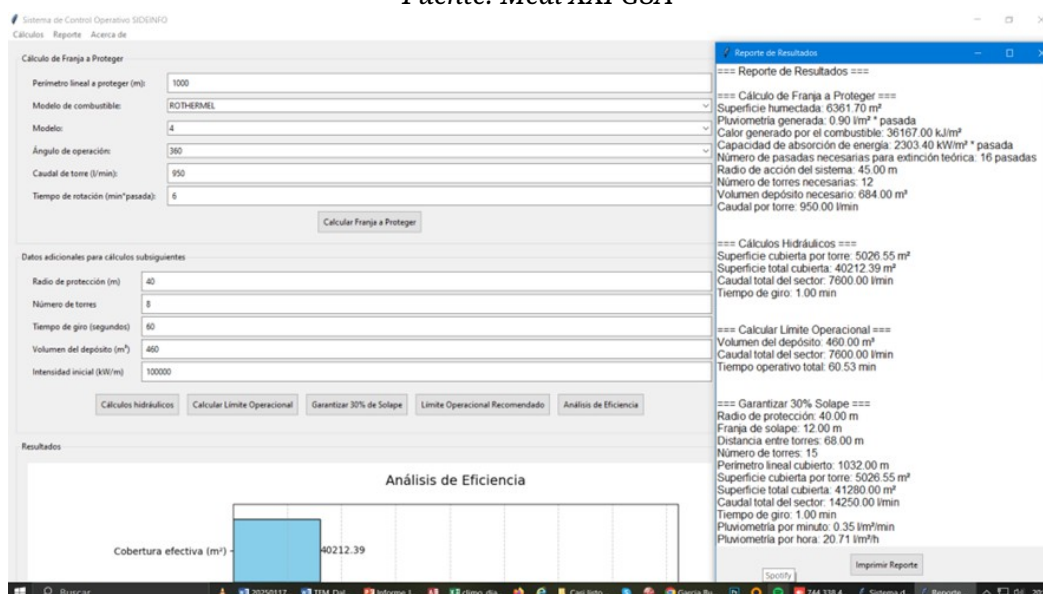


Figura 26. Resultado normalizado obtenido tras el cálculo de todos los parámetros para determinar el límite operativo del sistema. Fuente: Medi XXI GSA.

5. Discusión

El desarrollo e implementación de cortafuegos verdes mediante riegos prescritos ofrece una oportunidad clave para mejorar la defensa contra incendios en zonas de Interfaz Urbano-Forestal (IUF). Sin embargo, su éxito no se limita a la instalación de aspersores; requiere una integración de planificación, ingeniería forestal, silvicultura, hidrología, uso de agua regenerada, tecnología de monitorización y formación. Este trabajo demuestra que, a pesar de sus limitaciones, los riegos prescritos y los cortafuegos verdes pueden mejorar la seguridad de las zonas pobladas con alta eficacia técnica, social, económica y ambiental.

Entre las limitaciones, destaca la falta de normalización en las infraestructuras defensivas, especialmente en zonas de IUF. A diferencia de los sistemas de extinción en edificios, no existen estándares internacionales que regulen el diseño



y operatividad de los cortafuegos verdes, lo que dificulta su comparación y validación. Además, el uso del agua regenerada, aunque reduce el impacto ambiental, enfrenta desafíos en su disponibilidad y distribución, particularmente en contextos de sequía o infraestructura hídrica limitada. El equilibrio entre inversión y rendimiento también puede restringir la capacidad operativa, reduciendo el Volumen de Agua Movilizable (VAM). La selección de especies vegetales y estrategias silvícolas óptimas requiere conocimiento avanzado y adaptaciones locales, considerando factores como el tipo de combustible, topografía y meteorología, aunque a menudo se enfrenta a la falta de conocimiento o voluntad por parte de administraciones o colectivos.

Es necesario realizar más ensayos para evaluar el impacto de factores como el viento, la velocidad de propagación y la intensidad térmica, que pueden superar las capacidades del sistema incluso bajo parámetros optimizados. Además, se deben perfeccionar los modelos de cálculo, integrando nuevas variables para predecir con mayor precisión el impacto del fuego y la efectividad del riego prescrito. La expansión de sensores y sistemas de monitoreo en tiempo real es crucial para evaluar y ajustar continuamente el rendimiento de los cortafuegos verdes, ampliando la base de datos y el conocimiento disponible. Finalmente, es esencial analizar en profundidad los índices de riesgo, ya que el FWI, aunque ampliamente utilizado, puede no ser el más adecuado para determinar las situaciones de activación de medios.

6. Conclusiones

Este trabajo sobre los límites operativos de los riegos prescritos en la defensa contra incendios en áreas de Interfaz Urbano-Forestal (IUF) mediante cortafuegos verdes confirma su efectividad como una herramienta innovadora y complementaria. La inversión está justificada por su alto rendimiento social (mayor aceptación) y económico (relación 1:5). Los riegos prescritos, utilizando agua regenerada, mejoran la seguridad al reducir la intensidad lineal de los frentes de llama y retrasar la propagación hacia zonas urbanas, gracias a la humectación controlada del combustible vegetal y la creación de áreas defensivas. Combinado con una gestión silvícola adecuada, este enfoque asegura la sostenibilidad ambiental y económica.

Estos sistemas no solo reducen el consumo de agua potable, sino que también optimizan el uso de recursos urbanos, alineándose con los principios de la economía circular. Además, minimizan la necesidad de desviar recursos para proteger viviendas, permitiendo concentrar esfuerzos en la protección del entorno forestal (“salvar monte”). Las instalaciones han demostrado su eficacia en varios incendios reales, protegiendo personas, infraestructuras y ecosistemas, actuando como refugio para la fauna y flora durante la recuperación ambiental. Los datos evidencian que estas soluciones pueden contener impactos severos, incluso en condiciones extremas.

La versatilidad y escalabilidad de los riegos prescritos permiten su aplicación en instalaciones fijas y portátiles, adaptándose a diversos entornos y necesidades. Sin embargo, persisten limitaciones, como la falta de normalización, la dependencia de condiciones ambientales favorables y las restricciones de recursos hídricos. Estos desafíos subrayan la necesidad de desarrollar herramientas predictivas más precisas y protocolos operativos estandarizados. La integración de tecnologías avanzadas, como sensores y sistemas de monitoreo en tiempo real, junto con modelos de simulación robustos, ha optimizado las operaciones de defensa. No



obstante, es crucial seguir mejorando estos sistemas para adaptarse a escenarios más complejos y exigentes.

7. Agradecimientos

Gracias a todas las personas que han creído en el proyecto de cortafuegos verdes y riegos prescritos. A aquellos que como no sabían que era imposible lo hicieron. Y especialmente a quienes nos lo han puesto difícil. A nuestras familias. Que pese a nuestro pyrofreakismo, nos quieren y nos apoyan. Siempre parece imposible hasta que se hace.

8. Bibliografía

ASBJORNSEN, H.; GOLDSMITH, G.R.; ALVARADO-BARRIENTOS, M.S.; REBEL, K.; VAN OSCH, F.P.; RIETKERK, M.; CHEN, J.; GOTSCH, S.; TOBÓN, C.; GEISSERT, D.R.; GÓMEZ-TAGLE, A.; VACHE, K.; DAWSON, T.E.; 2011. Ecohydrological advances and applications in plant–water relations research: a review. *Journal of Plant Ecology*, vol. 4, no. 1-2, pp. 3-22. ISSN 1752-9921. DOI 10.1093/jpe/rtr005. Disponible en: <https://academic.oup.com/jpe/article/4/1-2/3/943258>

AGER, A.; VAILLANT, N.; FINNEY, M.; 2010. A comparison of landscape fuel treatment strategies to mitigate wildland fire risk in the urban interface and preserve old forest structure. *Forest Ecology and Management*, vol. 259, no. 8, pp. 1556-1570. ISSN 0378-1127. DOI 10.1016/j.foreco.2010.01.032. Disponible en: https://www.fs.fed.us/wwetac/old/arcfuels/docs/Ager_et_al_2010.pdf

ALCASENA, F.J.; SALIS, M.; NAULSAR, N.J.; AGUINAGA, A.E.; VEGA-GARCÍA, C.; 2016. Quantifying economic losses from wildfires in black pine afforestations of northern Spain. *Forest Policy Econ* 73, 153-167. doi:10.1016/j.forpol.2016.09.005. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/308348797_Quantifying_economic_losses_from_wildfires_in_black_pine_afforestations_of_northern_Spain.

BLANCO CANO, L.; MOLINA HERRERA, A. J.; GONZÁLEZ SANCHIS, M. C.; PÉREZ ROMERO, J.; DALMAU ROVIRA, F.; QUINTO PERIS, F.; GORGONIO BONET, E.; PASTOR, E.; DEL CAMPO GARCÍA, A. D.; (2022). GUARDIAN: Sistema de gestión contra incendios forestales para la prevención y defensa de la interfaz urbano-forestal mediterránea. In 8º Congreso Forestal Español: “La ciencia forestal y su contribución a los objetivos de desarrollo sostenible”. Sociedad Española de Ciencias Forestales. 1
<https://8cfe.congresoforestal.es/sites/default/files/actas/8CFE-437.pdf>

CASTELLNOU, M.; PAGÉS, J.; MIRALLES, M.; PIQUÉ, M.; 2009. Tipificación de los incendios forestales de Cataluña. Elaboración del mapa de incendios de diseño como herramienta para la gestión forestal. 5º Congreso Forestal Español. Ávila, 2009

CASTELLNOU M.; LARRAÑAGA, A.; MIRALLES M.; MOLINA, D.M.; 2010. Improving Wildfire Scenarios: Learning from Experience. Towards Integrated Fire Management – Outcomes of the European Project Fire Paradox - EFI Research Report nr. 23. “Fire Paradox”, Project no. FP6-018505. P. 121-133

CASTELLNOU, M.; BACHFISCHER, M.; MIRALLES, M.; RUIZ, B.; STOOFF, C. R.; VILÀ-GUERAU DE ARELLANO, J.; 2022. Pyroconvection classification based on atmospheric vertical profiling correlation with extreme fire spread observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127, e2022JD036920. <https://doi.org/10.1029/2022JD036920>.



CASTELLNOU, M.; NEBOT, E.; ESTIVILL, L.; MIRALLES, M.; ROSELL, M.; VALOR, T.; CASALS, P.; DUANE, A.; PIQUÉ, M.; GÓRRIZ-MIFSUD, E.; COLL, LL.; SERRA, M.; PLANA, E.; COLAÇO, C.; SEQUEIRA, C.; SKULSKA, I.; MORAN, P.; 2022. FIRE-RES Transfer of Lessons Learned on Extreme Wildfire Events to key stakeholders. Deliverable D1.1 FIRE-RES project. 119 páginas. DOI: <http://10.0.20.161/zenodo.10260790>

CASTELLNOU, M.; PRAT-GUITART, N.; ARILLA, E.; LARRAÑAGA, A.; NEBOT, E.; CASTELLARNAU, X.; VENDRELL, J.; PALLÀS, J.; HERRERA, J.; MONTURIOL, M.; CESPEDÉS, J.; PAGÈS, J.; GALLARDO, C.; MIRALLES, M.; 2019. Empowering strategic decision-making for wildfire management: avoiding the fear trap and creating a resilient landscape. *Fire Ecology*, 15, 31. <https://doi.org/10.1186/s42408-019-0048-6>.

CUI, X.; ALAM, T.; PERRY, G.; PATERSON, A.; WYSE, S.; y CURRAN, T.; 2018. Green firebreaks as a management tool for wildfires: Lessons from China. *Journal of Environmental Management*, vol. 233, pp. 329-336. ISSN 0301-4797. DOI 10.1016/j.jenvman.2018.12.043. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479718314658>

DALMAU-ROVIRA, F.; MOLINA-TERRÉN, D. M.; QUINTO-PERIS, F.; GORGONIO-BONET, E.; NOGUERA-FONT, S.; PÉREZ-FERRANDO, R.; BARCELÓ-PUIG, A.; BELENGUER-PERIS, E.; VARELA-NEGRE, M.; (2022). Creación de áreas de Interfaz Urbano-Forestal defendibles contra incendios mediante la implementación de riegos prescritos. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/365703363_8CFE-116_-Creacion_de_areas_de_Interfaz_Urbano-Forestal_defendibles_contra_incendios_mediante_la_implementacion_de_riegos_p](https://www.researchgate.net/publication/365703363_8CFE-116_-Creacion_de_areas_de_Interfaz_Urbano-Forestal_defendibles_contra_incendios_mediante_la_implementacion_de_riegos_prescritos) rescritos

HERNÁNDEZ SANCHO, F.; CASTELLET VICIANO, L.; & HERNÁNDEZ CHOVER, V.; (2022). *D6.4.11 Proposed Methodology for Economic Analysis*. Green Urban Actions for Resilient Fire Defense of the Interface Area. Universitat de València. Grupo de Economía del Agua.

HERNÁNDEZ SANCHO, F.; CASTELLET VICIANO, L.; & HERNÁNDEZ CHOVER, V.; (2022). *D6.4.12 Investment, Operation, and Maintenance Costs*. Green Urban Actions for Resilient Fire Defense of the Interface Area. Universitat de València. Grupo de Economía del Agua.

HERNÁNDEZ SANCHO, F.; CASTELLET VICIANO, L.; & HERNÁNDEZ CHOVER, V.; (2022). *D6.4.13 Quantification of Externalities*. Green Urban Actions for Resilient Fire Defense of the Interface Area. Universitat de València. Grupo de Economía del Agua.

HERNÁNDEZ SANCHO, F.; CASTELLET VICIANO, L.; & HERNÁNDEZ CHOVER, V.; (2022). *D6.4.14 Cost Analysis of Non-Action in Terms of Reuse and Fire Prevention*. Green Urban Actions for Resilient Fire Defense of the Interface Area. Universitat de València. Grupo de Economía del Agua. MADRIGAL, J.; ROMERO-VIVO, M.; RORIGUEZ Y SILVA, F.; 2019. Definición y recomendaciones técnicas en el diseño de puntos estratégicos de gestión. "Decálogo de Valencia" para la defensa integrada frente a los incendios en la gestión del mosaico agroforestal. *Sociedad española de ciencias forestales (SECF)*, Generalitat Valenciana ISBN: 978-84-941695-4-0

MARTÍNEZ MARTÍ, N.; DALMAU-ROVIRA, F.; BREWER, T.; 2005. Analysis of fire risk elements in the Wildland-Urban Interface. Case study: "La Ribera Alta", Valencia,



Spain. Roof Project. Cranfield University and Universitat Politècnica de València. <http://hdl.handle.net/10251/31515>

PASTOR FERRER, E.; DALMAU – ROVIRA, F.; ANGUIANO, F.; RUÍZ, M., ADOBES, V.; Gestión integral de incendios de interfaz urbano-forestal: el caso de estudio de los municipios de Riba-roja del Túria y Paterna. A: Congreso Forestal Español. "8º Congreso Forestal Español: Lleida 2022, 27 junio-1 julio 2022: actas 8CFE". Madrid: Sociedad Española de Ciencias Forestales (SECF), 2022, p. 1-13. ISBN 978-84-941695-6-4. <http://hdl.handle.net/2117/382727>

UTGRAF, BOMBERS; 2019. Guía operativa de presa de decisiones.

UTGRAF, BOMBERS; 2011. Guía operativa [GO 02.02]. Extinción de incendios forestales: Tipología de incendios y tácticas asociadas.