



2025 | **16-20**
GIJÓN | **JUNIO**

9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

9CFE-1335

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

Organiza





Polígonos tácticos automatizados para el apoyo en la toma de decisiones en Grandes Incendios Forestales

DALMAU-ROVIRA, F. (1), CASTELLNOU RIBAU, M. (2), MARTÍNEZ MARTÍ, N. (1), MIRALLES BOVAU, M. (1)

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

(2) Bombers de la Generalitat de Catalunya - Unitat Tècnica GRAF

Resumen

Se ha desarrollado una herramienta cartográfica denominada Sistema de Soporte Estratégico (Strategic Support System - 3S) para analizar y gestionar grandes incendios forestales mediante el uso de "polígonos de potencial de fuego" o polígonos tácticos. Esta herramienta resulta fundamental para la toma de decisiones en situaciones de incendios, ya que permite visualizar escenarios complejos, anticipar el comportamiento del fuego y planificar estrategias de intervención valorando el impacto de esa decisión.

La metodología se basa en la identificación de los peores escenarios posibles y la delimitación de macropolígonos de confinamiento que ayudan a gestionar la emergencia. No se trata de un simulador de incendios. A partir de estos, se analizan los flujos del fuego y se identifican puntos clave para intervenir. Los polígonos obtenidos se ajustan dinámicamente según el comportamiento del incendio y las oportunidades de trabajo disponibles, para ayudar a la dirección de extinción.

La implementación de esta herramienta ayuda a gestionar incendios complejos y a reducir la incertidumbre en la toma de decisiones. También resulta útil en procesos de planificación preventiva para determinar puntos críticos a gestionar de manera previa al fuego.

Palabras clave

Grandes incendios forestales, tecnologías cartográficas, áreas estratégicas de gestión, planificación de operaciones, extinción incendios forestales.

1. Introducción

Los Grandes Incendios Forestales (GIF) suponen un desafío creciente para la sociedad, y especialmente para los Servicios Públicos de Emergencias. Debido a múltiples causas territoriales y socioeconómicas, agravadas por el cambio climático, la acumulación de combustibles y las nuevas dinámicas de uso del suelo, este tipo de incidentes suponen un riesgo creciente en materia de protección civil. La Interfaz Urbano-Forestal (IUF) desempeña un papel crítico en las operaciones de gestión de los GIF y por tanto, también tiene un papel clave en el cálculo de los polígonos de potencial de fuego. Esta zona, donde las áreas urbanizadas (pueblos, urbanizaciones, polígonos industriales...) entran en contacto directo con terrenos forestales, introduce desafíos relevantes en tanto en cuanto supone una amenaza desde la perspectiva de la protección civil y amplifica las complejidades de la extinción de incendios. Todo lo anterior, combinado, complica las labores de dirección de operaciones y de extinción de incendios, especialmente, las de toma de decisiones en las escalas estratégicas y tácticas. En este tipo de incidentes se somete a la Dirección Técnica de Extinción a una gran presión que puede generar ineficiencia, o fallos catastróficos. Las herramientas de soporte para la toma de decisiones en emergencias forestales resultan pues imprescindibles para gestionar estos eventos con eficacia, minimizando riesgos humanos y económicos.

El concepto de "polígonos de potencial de fuego" o "polígonos tácticos" (Figura 1,

Castellnou et al, 2023) surge como una metodología innovadora desarrollada por el grupo GRAF del cuerpo de Bombers de la Generalitat de Catalunya y, hasta ahora, el desarrollo de esta herramienta se fundamentaba básicamente en el análisis y la delimitación de los polígonos sobre cartografía mediante el criterio experto.

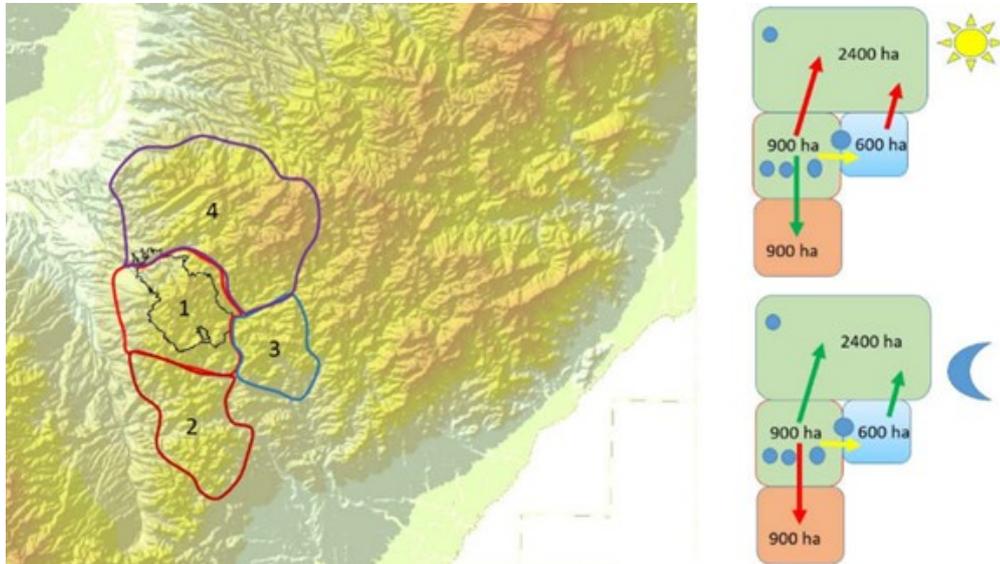


Figura 1. Esquema de las superficies contenidas entre ejes de confinamiento (polígonos tácticos) establecidos en el incendio de Tivissa el 15 de junio de 2014 y los flujos de desarrollo de día o de noche. Fuente: Bombers de la Generalitat de Catalunya

El desarrollo de la herramienta cartográfica para su automatización e implementación en Sistemas de Información Geográfica ha sido llevado a cabo por el equipo de Medi XXI GSA (València) bajo el nombre *Strategic Support System* (3S). Esta metodología permite una representación cartográfica de las áreas clave en la propagación y control de incendios, ofreciendo una guía visual y táctica para la planificación y ejecución de estrategias de extinción.

El cambio en la dinámica de los incendios forestales debido a fenómenos climáticos extremos y al aumento de zonas con acumulación de combustibles ha incrementado la complejidad de las estrategias de manejo. Los incendios de sexta generación (Castellnou et al, 2019) caracterizados por su alta intensidad y velocidad, representan un reto que supera las capacidades de los métodos tradicionales. La metodología de polígonos tácticos surge como una herramienta de apoyo para abordar estas limitaciones y prestar servicio a las direcciones de extinción reduciendo las opciones de fallo humano derivadas del manejo de grandes volúmenes de información. Este tipo de cartografía se enmarca dentro de los PAI (Plan de Actuación de la Intervención) con el objetivo de trabajar con una estrategia clara y unos objetivos tácticos bien definidos que permitan incrementar la seguridad y controlar mejor el progreso de las operaciones, así como valorar y solicitar los recursos adecuados o tomar decisiones con suficiente antelación. La elaboración de los polígonos se integra dentro de la fase de definición de objetivos del PAI (Plan de Actuación de la Intervención) (Figura 2).



Figura 2. Esquema cíclico de los pasos secuenciales del proceso de planificación de una intervención. Fuente: Bombers de la Generalitat de Catalunya

1.1. Contexto histórico

Desde los años 90, los servicios de emergencias han evolucionado significativamente, adoptando herramientas tecnológicas para mejorar la toma de decisiones en campo. El desarrollo del grupo GRAF marcó un hito en Cataluña, al establecer una estructura dedicada al análisis avanzado de incendios, priorizando la prevención y la planificación estratégica. Pero la tecnología no siempre resulta útil por diversos motivos. Puede haber una falta de conocimiento específico, no estar dotada de la agilidad necesaria, requerir unos conocimientos que no están al alcance de gran parte de los usuarios potenciales... constituyendo todo ello un reto en materia de desarrollos tecnológicos.

La presente herramienta se ha elaborado bajo la perspectiva de que cualquier usuario medio de un GIS (QGIS, ArcGIS...) pueda utilizarla sin excesivas complicaciones, simplemente aportando las capas de información requeridas para el cálculo de los polígonos. Por ello, el sistema 3S solicita unas capas básicas y devuelve la capa de polígonos tácticos con la facilidad o dificultad de conexión entre dichos polígonos, emulando los procesos manuales que se desarrollan en la actualidad. Durante todo el proceso se ha testado el sistema tanto para monitorizar incendios reales como para procesos de planificación preventiva, contribuyendo a la identificación de Puntos Estratégicos de Gestión (PEG). Los Puntos Estratégicos de Gestión (PEG) y los polígonos tácticos son herramientas complementarias diseñadas para optimizar la gestión y la extinción de grandes incendios forestales, mediante la planificación proactiva y el análisis estratégico del comportamiento del fuego (Figura 3).

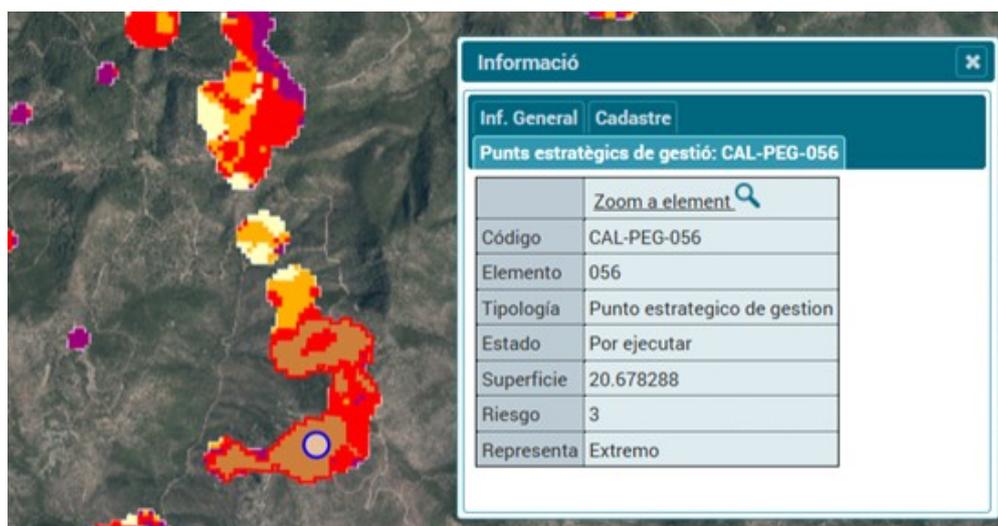


Figura 3. Punto Estratégico de Gestión asociado a un plan de prevención de incendios forestales del Parc Natural de la Serra Calderona (València). Fuente: Generalitat Valenciana.

Los PEG se centran en áreas del territorio donde la modificación del combustible y la preparación de infraestructuras permiten la ejecución segura de maniobras de extinción, priorizando zonas clave según su vulnerabilidad y riesgo. Por su parte, los polígonos tácticos amplían esta lógica al delimitar áreas más grandes basadas en análisis dinámicos del comportamiento del fuego, ajustando estrategias operativas en tiempo real según las condiciones del incendio. Ambos conceptos integran metodologías de simulación y criterio experto, utilizando modelos de propagación y análisis territorial para priorizar intervenciones que maximicen la eficiencia y seguridad de los recursos de extinción. La interacción entre PEG y polígonos tácticos fomenta un enfoque coordinado que combina planificación preventiva y acción adaptativa para afrontar incendios forestales de alta complejidad.

2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es dotar a la Dirección Técnica de Extinción de Grandes Incendios Forestales de una herramienta de apoyo estratégico y táctico que permita una toma de decisiones objetiva reduciendo la posibilidad de errores fundamentando las operaciones en datos, y advirtiendo posibles riesgos. Los retos actuales incluyen la adaptación de las estrategias de gestión a escenarios con alta incertidumbre y recursos limitados. Además, la integración de datos en tiempo real y su aplicación en modelos predictivos es esencial para optimizar la eficacia de las intervenciones. Dicho esto, el objetivo de esta investigación ha sido:

- Evaluar la aplicabilidad de los polígonos de potencial de fuego como herramienta de soporte estratégico en la gestión de GIF.
- Analizar la efectividad de la herramienta en escenarios reales y su capacidad para reducir la incertidumbre en la toma de decisiones.
- Proveer recomendaciones para su implementación y mejora continua en sistemas de gestión de emergencias forestales.
- Incorporar modelos predictivos basados en datos meteorológicos y de comportamiento del fuego para mejorar la precisión de los polígonos.

3. Metodología

La metodología de trabajo para el desarrollo de la herramienta se ha fundamentado en diversas reuniones técnicas que han dado paso al proceso de

programación, intentando capitalizar y traducir a formato de “script” el conocimiento experto de la Unidad GRAF de Bombers de la Generalitat de Catalunya. Para ello se han llevado a cabo los siguientes pasos:

3.1. Identificación y delimitación automática de polígonos de potencial

Los polígonos se generan a partir de:

- Análisis de combustibles: segmentación por tipología y distribución (Figura 4).

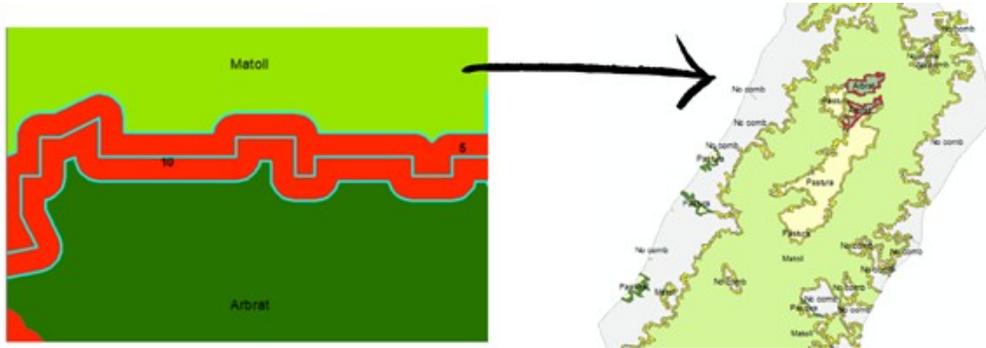


Figura 4. Detalle de nivel de conectividad entre matorral y zona con vegetación arbórea. Fuente: Medi XXI GSA

- Condiciones meteorológicas: sólo se considera la dirección del viento. En la Tabla 1 se presentan las ponderaciones fijadas para cada valor de dirección del viento.

Tabla 1. Ponderación del valor del viento en función de la orientación y la dirección del viento

Norte	10	10	5	5	10
Sur	5	10	10	10	5
Este	5	10	10	10	5
Oeste	5	5	10	10	10

- Topografía: influencia del terreno en el comportamiento del fuego obteniendo carenas, cursos de agua, y cambios de rasante de forma automática (Figura 5).



Figura 5. Obtención automática de recintos geográficos para un GIF en el parque natural de la Serra de Collserola en Barcelona. Fuente: Medi XXI GSA

- Vías de comunicación: se consideran zonas de oportunidad y se integran de

forma automática en el cálculo de los polígonos discriminando a partir de una anchura mínima que garantice su utilidad (Figura 6).

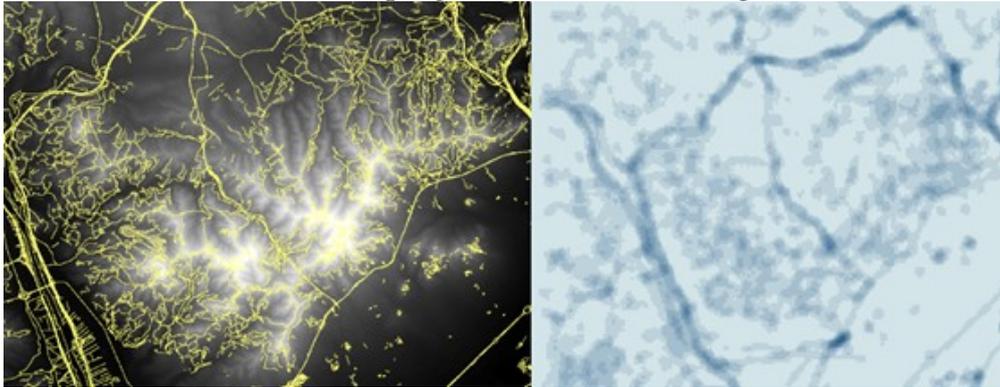


Figura 6. Detalle de parte del proceso de integración de viales en la herramienta 3S para un GIF en el parque natural de la Serra de Collserola en Barcelona. Fuente: Medi XXI GSA

- Zonas de Interfaz Urbano - Forestal: se integran en el cálculo como factor de distorsión de las operaciones en tanto en cuanto un polígono con zona de I-UF supondrá un cierto secuestro de medios y la necesidad de priorizar su atención respecto a otro que no tenga presencia de población o edificaciones. A través de la herramienta ROOF (Martínez y Dalmau, 2005), es posible la extracción automática de tejados y otras infraestructuras urbanas a partir de imágenes de alta resolución, como ortofotografías. Esto se logra mediante procesos automatizados que incluyen la clasificación de píxeles y la segmentación basada en características geométricas y espectrales (Figura 7). Una vez el sistema calcula los recintos, procede a la priorización y el cálculo de la conectividad entre ellos. También se puede utilizar la cartografía oficial de I-UF en caso de existir.

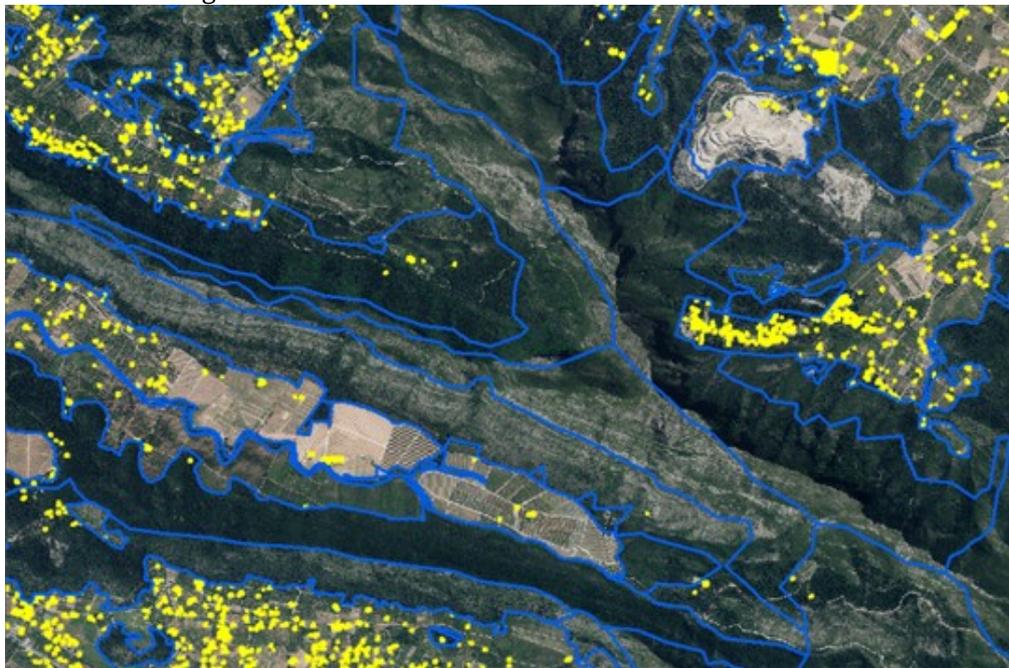


Figura 7. Obtención de las edificaciones en relación a los recintos geográficos para la obtención de los polígonos tácticos. Fuente: Medi XXI GSA

- Alineación de factores: uno de los objetivos de los polígonos tácticos es evaluar la facilidad o la dificultad de interrumpir el paso de un recinto a

otro. Se clasifica en tres niveles en función del grado de alineación de sistema de predicción de Campbell. En función del viento facilitado, la orografía del terreno y la exposición del recinto, obtiene un cálculo del grado de alineación de los polígonos tácticos (Figuras 8 y 9).

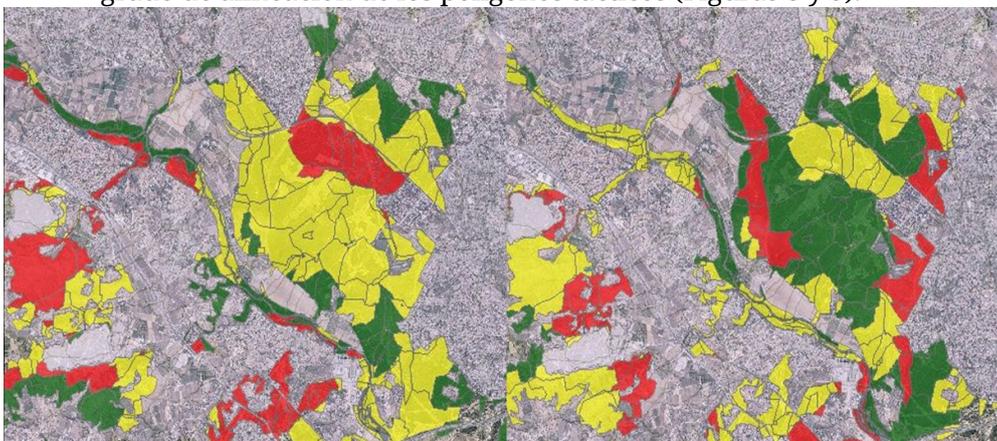


Figura 8. Cartografía con el grado de alineación de polígonos en función de la variable viento (del norte en la imagen izquierda y del este en la imagen derecha) para el cálculo de infraestructuras de defensa contra incendios forestales SIDENFO en el Parque Natural del Túrria (València). Proyecto GUARDIAN.

Fuente: Medi XXI GSA

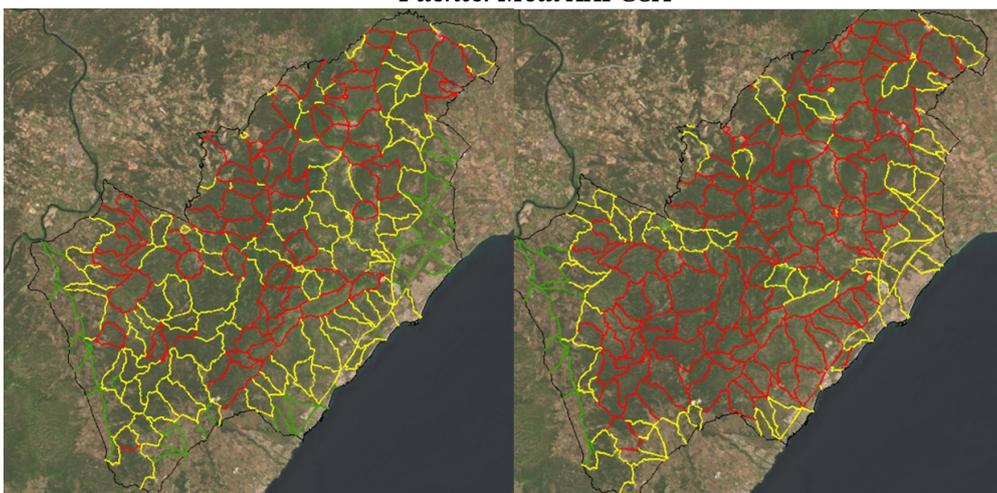


Figura 9. Cartografía del grado de alineación Campbell con vientos del NW (izquierda) y con vientos del S (derecha) y clasificación de la facilidad o dificultad de interrupción de la propagación entre polígonos tácticos ya calculados en el macizo forestal de la Serra de Collserola (Barcelona). Fuente: Medi XXI GSA.

Cada uno de estos factores se aporta a la herramienta para su ingesta y procesado posterior permitiendo la obtención de los polígonos. El resultado final es facilitado a la Dirección Técnica de Extinción para su validación y adopción, o en caso necesario, su edición y modificación.

3.2. Aplicación en emergencias

Bombers de la Generalitat de Catalunya a través de la Unitat GRAF lleva años aplicando esta metodología en formato analógico. Los analistas realizan la valoración del incidente y generan un “árbol” de resolución del incendio basado en los polígonos de potencial. A cada polígono se le asigna el valor de superficie que implica y una flecha que representa la facilidad o dificultad para interrumpir la propagación entre ellos (Figura 10).

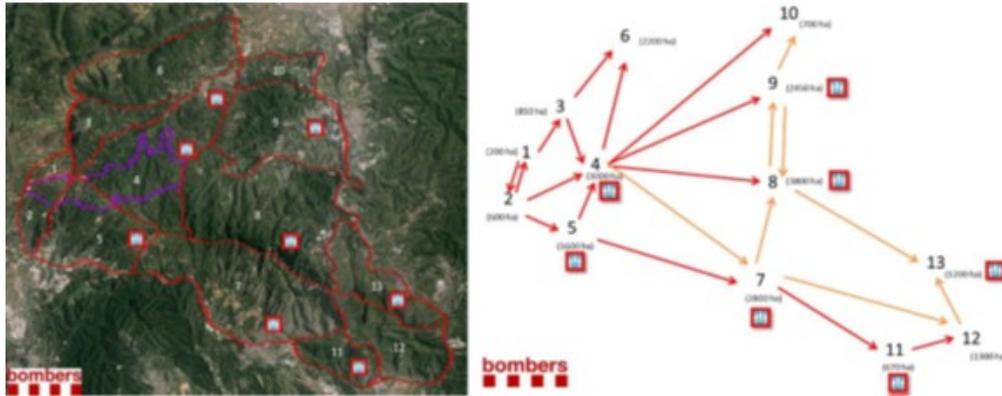


Figura 10. Análisis y la planificación del incendio de Òdena 2015. A la izquierda, imagen con los polígonos de potencial numerados (rojo), el perímetro final del incendio (morado) y los iconos de los polígonos donde había zonas de interfaz urbano-forestal. A la derecha, esquema de los flujos y probabilidad de paso del incendio entre polígonos, con la superficie asociada a cada polígono y los iconos con zonas de interfaz urbano-forestal. Fuente: Bombers de la Generalitat de Catalunya.

El reto era conseguir este tipo de cartografía de forma automatizada “digitalizando” el criterio experto. El proceso descrito en el epígrafe 3.1. del presente trabajo permite hacerlo, y una vez obtenida la primera versión aplicar un proceso iterativo donde los polígonos son redefinidos de acuerdo con el avance del incendio, el conocimiento experto de la persona que dirige el incidente y su equipo, así como las oportunidades tácticas detectadas por el equipo de gestión. Este proceso, de forma paralela, incluye simulaciones de comportamiento del fuego basadas en modelos como el sistema FARSITE y herramientas de predicción atmosférica. Dado que Bombers ya utilizaba la herramienta, lo que faltaba era validar la versión digital, y para ello se han analizado incendios históricos, y se han escogido casos de incendios reales, tal y como se describe en el epígrafe siguiente.

3.3. Validación mediante casos de estudio

Se ha llevado a cabo una validación empírica basada en la obtención de los polígonos de forma manual y de forma automática para ver similitudes y diferencias. El siguiente paso es la validación numérica del grado de correlación entre los perímetros reales y los límites de los polígonos obtenidos (Figura 11). También se han llevado a cabo pruebas durante incendios reales para testar el tiempo necesario para la obtención de la información una vez iniciado el incidente. La aplicación permite determinar el tamaño de los polígonos pudiendo generar polígonos de alta definición (menor tamaño).

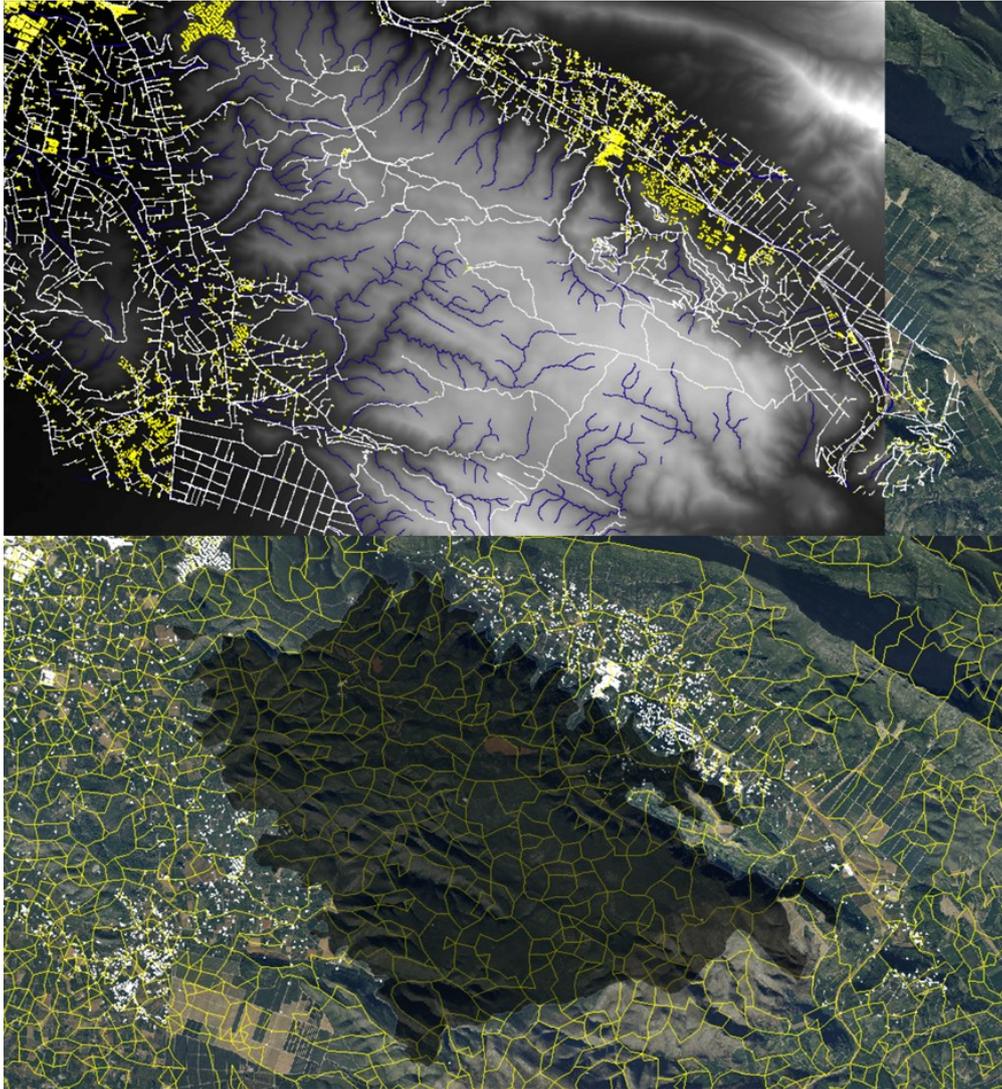


Figura 11. Proceso de construcción de polígonos tácticos de alta definición y trabajo de validación con perímetros de incendios históricos. Caso de estudio GIF Carcaixent, 2016.

Los casos analizados han sido el incendio de Tivissa (2014), Llutxent (2018) el Perelló (2019), Santa Coloma de Queralt (2021) y El Pont de Vilomara (2022). En cada caso, se documenta el impacto del uso de esta herramienta en la reducción de áreas quemadas y la mejora en la seguridad de los equipos de intervención. En 2023 se utilizó para estimar el potencial del incendio de Alzira en la Serra de les Agulles donde, además, se simuló la propagación del incendio forestal por separado para ver posibles zonas de oportunidad y coincidencia con los polígonos obtenidos (Figuras 12 y 13).

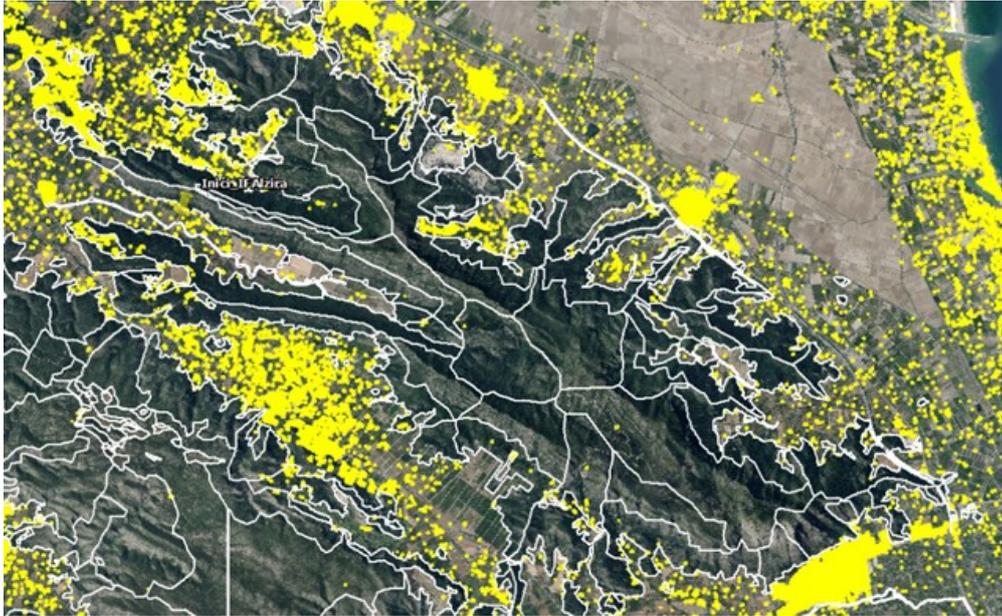


Figura 12. Polígonos tácticos obtenidos durante el incendio forestal de Alzira de 14 de abril de 2023 a partir del punto de inicio con viento de poniente. Fuente: Medi XXI GSA.



Figura 13. Propagación por el primer polígono obtenido durante el incendio forestal de Alzira de 14 de abril de 2023 a partir del punto de inicio con viento de poniente. Fuente: Medi XXI GSA.

3.4. Desarrollo de modelos predictivos del daño potencial

La incorporación de datos geográficos al proceso cartográfico puede permitir aportar datos más allá de superficies (valor económico, ambiental, riesgo potencial poblacional...) y predecir el daño esperable según la propagación prevista, así como reportar datos exactos del número de hectáreas potencialmente quemadas, cantidad de edificaciones, espacios naturales, infraestructura crítica... incorporando otras capas cartográficas con dichos elementos. En la actualidad se ha optado por polígonos sin contenido, centrando la decisión en hectáreas afectadas, viales y viviendas y es posible ir ajustando los polígonos de manera dinámica para maximizar la eficiencia en la extinción.

4. Resultados

4.1. Impacto en la planificación preventiva

Tras el desarrollo de una versión mínima viable de la aplicación, se utilizó de forma aplicada para la definición de polígonos de potencial en el Perímetro de Protección Prioritaria (PPP) del área de Muntanyes de Tivissa-Vandellòs-Llaberia-Pradell (Figura 14). Durante el desarrollo del proyecto se ha demostrado que es una herramienta versátil en la fase de planificación estratégica frente a incendios forestales y, de hecho, la planificación resultante incluyendo los polígonos, sus conexiones y los PEG resultantes han sido tramitados y aprobados. En términos cuantitativos, el territorio gestionado en esta primera prueba de concepto abarca un total de 56.285 hectáreas, distribuidas entre 23 municipios y 4 comarcas, y presenta una notable heterogeneidad en términos de vulnerabilidad, características topográficas y biodiversidad. La obtención de los polígonos de potencial, validados a partir de la experiencia en incendios históricos y simulaciones de comportamiento del fuego, han aportado una herramienta dinámica para los trabajos de planificación ayudando a priorizar intervenciones (e inversiones) en zonas con mayor probabilidad de propagación, minimizando así la vulnerabilidad del territorio frente a eventos de alta severidad.

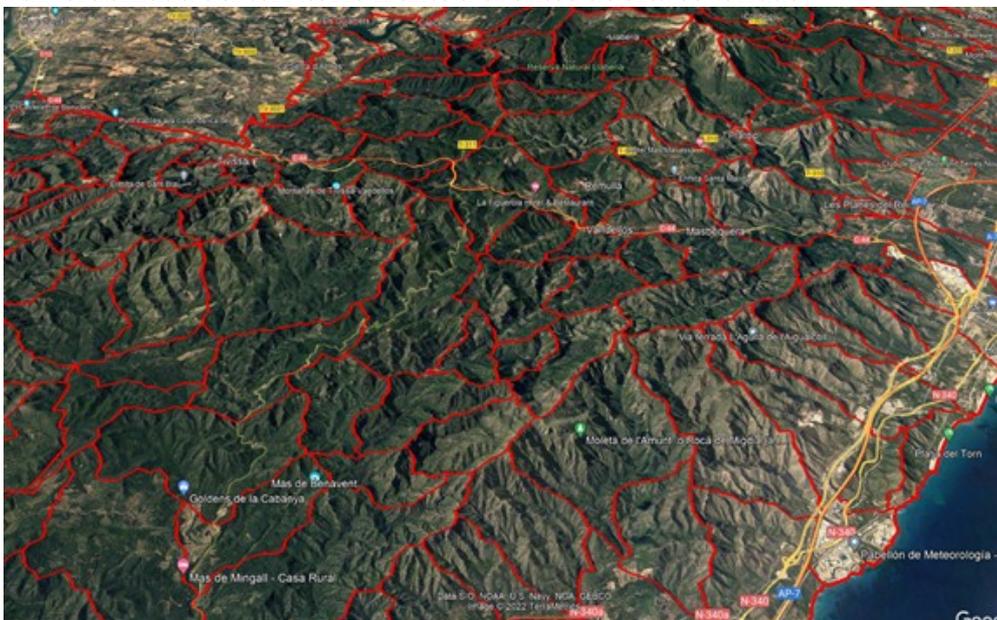


Figura 14. Polígonos elaborados mediante la herramienta Strategic Support System (3S) y SIG para escenario de incendio forestal topográfico del 08/04/1998, incendio forestal de viento con relieve del 15/11/2004 e incendio de viento con relieve y contraviento del 14/04/1994. Fuente: Medi XXI GSA.

Cada tipo de incendio, así como las generaciones de estos, han condicionado, condicionan y condicionarán la respuesta del sistema de extinción que se implementa en el territorio. Determinar la progresión potencial de los incendios contribuye a planificar la estrategia. Los polígonos tácticos son una de las primeras herramientas que se emplean para zonificar y delimitar el territorio frente a los Grandes Incendios Forestales, hacia los cuales se enfoca esta planificación preventiva. Estos polígonos se han agrupado y delimitado tras la discusión técnica de las comisiones de trabajo, que han implicado a gestores técnicos y personal de la Unitat GRAF de Bombers de la Generalitat, de acuerdo con:

- Zonas homogéneas de régimen de incendio.
- Grandes cuencas a escala de macizo.
- Tipología de incendios de referencia.



- Discontinuidades (naturales o artificiales).
- Presencia de Interfaz Urbano Forestal.

Los polígonos establecidos determinan las escalas de trabajo en función de la generación del incendio, la capacidad de lectura del incendio y el objetivo del sistema de respuesta. Asimismo, sirven como base para el análisis y las actuaciones defensivas posteriores a plantear. Desde el punto de vista ambiental, la integración de hábitats protegidos dentro de los polígonos ha reducido significativamente la afectación a áreas de alta biodiversidad, incluyendo hábitats prioritarios como prados mediterráneos y pinares submediterráneos, que constituyen aproximadamente el 8% del área de trabajo. Además, la planificación basada en polígonos y la ejecución de las medidas recogidas en estos documentos permitiría proteger las zonas de Interfaz Urbano-Forestal, donde reside el 66,49% de las personas del área de estudio, mitigando los riesgos para las comunidades humanas. Por otro lado, las simulaciones realizadas han revelado que los polígonos delimitados mejoran la capacidad operativa al proporcionar puntos tácticos donde los equipos pueden realizar maniobras seguras y efectivas. Estas áreas, definidas como "zonas de oportunidad", están estrechamente relacionadas con discontinuidades del paisaje y elementos existentes, como carreteras y áreas agrícolas, que pueden ser aprovechadas para contener el avance del fuego.

Finalmente, el análisis de escenarios desfavorables, como los asociados a incendios bajo condiciones de viento extremo del noroeste, muestra que los polígonos permiten predecir movimientos aproximados del fuego, reduciendo la incertidumbre y facilitando la toma de decisiones. Este enfoque proactivo no sólo refuerza la planificación preventiva, sino que también fortalece la respuesta ante emergencias, garantizando una gestión más efectiva y sostenible del paisaje forestal.

Estos polígonos resultantes se han establecido en base a la combinación de los datos cartográficos mencionados anteriormente, implementados en el Strategic Support System (3S) y los Sistemas de Información Geográfica (SIG). En total, se han generado 208 polígonos, con una superficie media de 270,6 hectáreas (Figura 15). A partir de estos polígonos, se realiza un análisis para determinar la estrategia para cada escenario de incendio de referencia, en este caso, vientos del noroeste (NW o de mistral en el caso concreto de este macizo), de acuerdo con datos aportados por los analistas. A su vez, los polígonos se interrelacionan entre sí, analizando la posible conectividad entre ellos en forma de árbol de toma de decisiones, basados en la probabilidad de paso del fuego (muy probable, probable y poco probable) considerando: alineación de fuerzas según el sistema de predicción de Campbell (CPS), zonas de discontinuidad del combustible, anclajes y oportunidades, capacidad táctica del sistema de respuesta (dónde y cómo intervenir), incluyendo seguridad de los intervinientes, accesibilidad y ventanas de actuación (tiempo y espacio de maniobra).

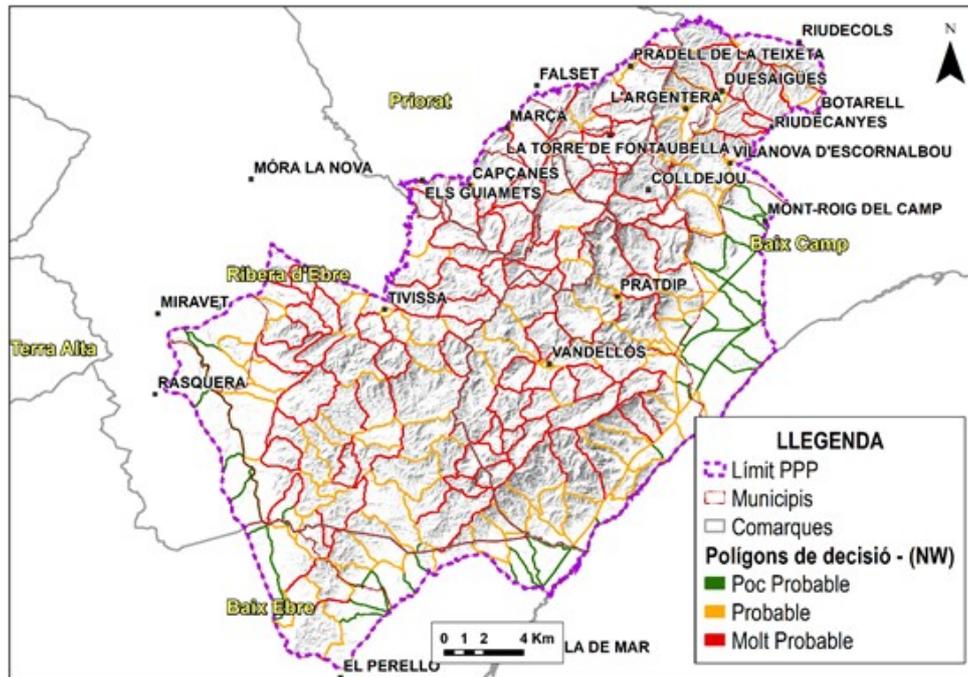


Figura 15. Conectividad entre polígonos dentro del perímetro de protección prioritaria del macizo forestal Tivissa-Vandellòs-Llaberia-Pradell para situaciones de viento de noroeste. Fuente: Medi XXI GSA

De este modo, según el tipo de incendio potencial estudiado y en función de las condiciones sinópticas tipificadas analizadas, se determina su conectividad. Posteriormente el sistema lleva a cabo un análisis de la probabilidad de paso de los fuegos entre los polígonos para las condiciones sinópticas previamente mencionadas: vientos del noroeste y vientos del sur en el caso del macizo Tivissa-Vandellòs-Llaberia-Pradell (Figura 16). A partir del estudio de estas probabilidades se decide la ubicación de los PEG. De cada uno de estos Puntos Estratégicos de Gestión, y vinculados a los polígonos tácticos, se desarrolla una ficha específica (Figura 17). Todas estas actuaciones han quedado recogidas en un programa económico y temporal que ha sido validado por la administración. El presupuesto de todas las actuaciones previstas de prevención de incendios forestales y validadas mediante esta metodología suponen una inversión de 7.089.238,48 € en total, lo que atendiendo a las hectáreas de la zona supone una inversión de 125,96 €/ha.

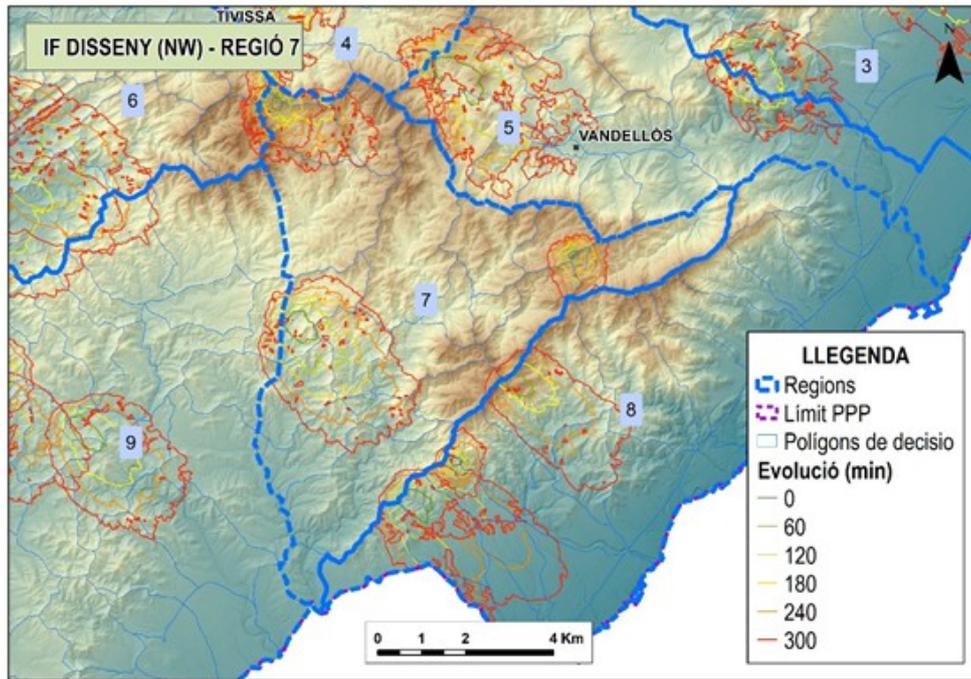


Figura 16. Simulación de incendios tipo simultáneos en un escenario de viento NW para un total de 5 horas sobre los límites previstos de los polígonos tácticos. Fuente: Medi XXI GSA

Croquis de situació	Justificació de les actuacions
	<p>Descripció Actuacions recolzades en vials que creuen l'àrea, i sobre zones agrícoles en ús, per generar una discontinuïtat davant incendis de vent</p> <p>Superfície d'actuació estimada 15,4 ha</p> <p>IF referència - 08/04/1994 - 03/12/2007</p> <p>IF tipus Vent - vent amb relleu</p> <p>Connectivitat entre polígons Pol. 1 - Pol. 2. El Pol. 27 també rebria influència al connectar-se directament amb la seva zona agrícola</p> <p>Potencial 250 ha</p>

Figura 17. Ficha de la actuación 1-PEG-P1-P2-V entre los polígonos 1 y 2 que cortaría un potencial de crecimiento del incendio de 250 hectáreas actuando sobre 15,4 hectáreas. Fuente: Medi XXI GSA.

El mismo procedimiento se ha repetido en la redacción del *Pla d'Infraestructures Estratègiques i Bàsiques de Prevenció d'Incendis Forestals a la zona d'alt risc i de Protecció Prioritària Preferent del sector territorial de les Terres del Francolí i el Baix Gaià* para una superficie de 25.189,06 hectáreas, en 27 términos municipales de 3 comarcas distintas. Los resultados obtenidos indican el potencial de propagación del fuego en función de diferentes situaciones sinópticas cuando un incendio se produce o alcanza cada uno de los polígonos de progresión del fuego. En total para este macizo se han obtenido 76 polígonos para el sector norte y 29 para situación sur (Tabla 2). La ejecución de todas las actuaciones previstas supondría una inversión de 5.087.715,53€ que considerando las hectáreas totales

de la zona a proteger supondría una inversión de 201,98€/ha.

Tabla 2. Superficies potencialmente afectadas por la ocurrencia de un posible incendio forestal para cada uno de los polígonos de progresión del fuego en diferentes condiciones sinópticas, para el sector norte de la zona analizada. Fuente: Unitat GRAF y Medi XXI GSA.

SCN-01	898,25	1.121,25
SCN-02	542	621,5
SCN-03	1.450,75	1.158,25
SCN-04	1042	1.432,75
SCN-05	2.074,75	1645
SCN-06	1.107,75	860
SCN-07	1.016,25	507,5
SCN-08	451	359,75
SCN-09	680,5	448,25
SCN-10	482	233
SCN-11	243	735,75
SCN-12	735	905,25
SCN-13	844	514
SCN-14	237	280,5
SCN-15	616	570
SCN-16	603,25	1216
SCN-17	1.158	1.022,25
SCN-18	36	36
SCN-19	28	28
SCN-20	272	815,75
SCN-21	585,5	627,5
SCN-22	486,75	571,25
SCN-23	530	522,25
SCN-24	686,5	242

MT 6: FUEGO Y OTROS RIESGOS ABIÓTICOS



SCN-25	250,5	485
SCN-26	496,5	655,75
SCN-27	822,5	571,75
SCN-28	886	841,25
SCN-29	386,25	395,5
SCN-30	275,75	310
SCN-31	575	526
SCN-32	436,25	460,25
SCN-33	881,75	901,75
SCN-34	586	1224
SCN-35	1.115,25	699,5
SCN-36	509,5	315,25
SCN-37	402	679,25
SCN-38	451,25	465
SCN-39	705,75	936,25
SCN-40	167,25	239,25
SCN-41	354,25	301,5
SCN-42	329,25	315,75
SCN-43	429,25	483
SCN-44	611	399
SCN-45	766	757
SCN-46	1.610,25	728
SCN-47	298,5	575
SCN-48	772,75	732
SCN-49	134	134
SCN-50	552,5	305
SCN-51	177	119,75

MT 6: FUEGO Y OTROS RIESGOS ABIÓTICOS



SCN-52	251,25	429
SCN-53	681,5	852,75
SCN-54	112	112
SCN-55	351,5	405,5
SCN-56	27	27
SCN-57	67	67
SCN-58	394	199,25
SCN-59	475,75	1.046,75
SCN-60	528,5	594,5
SCN-61	533,25	340,25
SCN-62	403	548,25
SCN-63	747,5	544,5
SCN-64	841	735,75
SCN-65	119	119
SCN-66	1.093,75	778
SCN-67	898,5	732,75
SCN-68	419,5	161,75
SCN-69	409,5	1.032,75
SCN-70	1.043,25	959,75
SCN-71	946,25	1.248,5
SCN-72	1.013,75	593,75
SCN-73	594,5	1.073,5
SCN-74	983	681,5
SCN-75	942,25	663,25
SCN-76	653	725

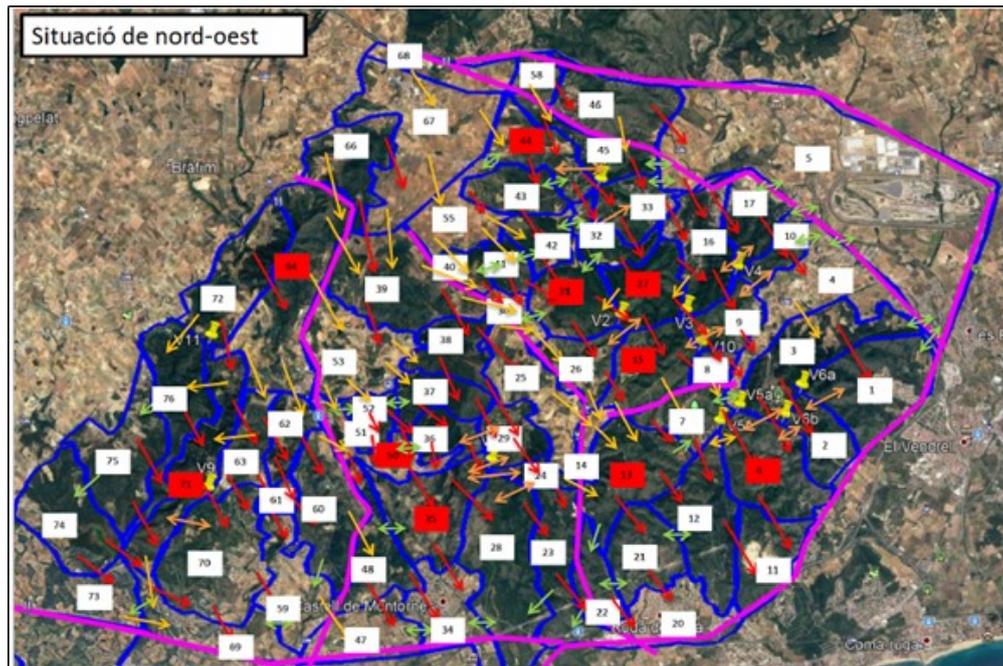


Figura 18. Conexión entre polígonos del Sector Centro-Norte. Escenario con viento entre polígonos de NW a SW. La flecha roja representa paso de fuego entre recintos muy probable; la flecha naranja representa paso de fuego probable; la flecha verde representa paso de fuego poco probable. Font: GRAF.

4.2. Impacto en la planificación de operaciones

Los polígonos de potencial o polígonos tácticos son una herramienta operacional que permite identificar y gestionar la incertidumbre, aportar una visión general del fuego y explicar lo que puede hacer, tanto a expertos como a inexpertos. Los polígonos eliminan incertidumbre y aportan una imagen clara y certera de la situación. Por ello, son una herramienta útil para la toma de decisiones, para comunicar dichas decisiones y para incrementar la credibilidad del dispositivo. Los resultados obtenidos demuestran que el uso de esta metodología de trabajo:

- Reduce los tiempos de respuesta inicial.
- Permite una mejor priorización atendiendo a criterios objetivos.
- Mejora la identificación de áreas críticas y evita que la gran cantidad de información que se gestiona durante un incidente pueda conducir a errores estratégicos que empeoren la situación.
- Incrementa la eficiencia en el despliegue de recursos al no tratar de atender el incendio en zonas que no son verdaderamente de oportunidad y entrañan un mayor riesgo.
- Facilita la coordinación interinstitucional en situaciones de emergencia.



Figura 19. Cartografía de ejes de confinamiento de los polígonos de potencial y Puntos Estratégicos de Gestión (PEG) ordenados en función de la prioridad de actuación. Fuente: Pla d’Infraestructures Estratègiques i Bàsiques de prevenció d’incendis forestals del PPP Muntanyes de Tivissa-Vandellòs-Llaberia-Pradell (ET2) elaborado conjuntamente por Medi XXI GSA y la Unidad GRAF de Bombers para la Generalitat de Catalunya.

Este impacto sobre las operaciones tiene además otra derivada que es la del análisis posterior para la extracción de lecciones aprendidas. Este sería el caso del Gran Incendio Forestal del Pont de Vilomara. La implementación de la herramienta Strategic Support System (3S) en el trabajo de análisis de este tipo de incendios, como se ejemplifica en el informe posterior del incendio del Pont de Vilomara, aporta una capacidad significativa para comprender y anticipar (durante las operaciones) o analizar posteriormente el comportamiento del fuego. La herramienta permite generar polígonos de decisión basados en datos cartográficos precisos y sencillos, análisis topográficos y modelos de combustible, lo que facilita la creación de estrategias específicas para cada escenario potencial.

En el caso del Pont de Vilomara, el uso de 3S hubiera permitido automatizar con mayor rapidez las áreas de mayor impacto, como los polígonos con pendientes elevadas y alineación favorable al viento, que aceleraron la propagación inicial del incendio. Esto habría contribuido a una mejor delimitación de zonas críticas y la priorización de recursos en áreas estratégicas en menor tiempo (Figura 20). No obstante, la priorización del flanco derecho basada en el criterio experto del personal de Bombers de la Generalitat de Catalunya, supuso una reducción significativa de la superficie afectada.

Se trató de un incendio exprés que en poco tiempo impactó contra diversos núcleos de población complicando notablemente las labores de extinción (Figura 21). Para ilustrar este hecho cabe indicar que de las 709 parcelas existentes en la Urbanización River Park, en el polígono de potencial 7 del modelo obtenido mediante 3S, 260 estaban edificadas. De estas, 201 no presentaban afectación estructural. De las que sí tenían daños, 27 presentaban afectación exterior o parcial, y 32 afectación total (Dalmau et al, 2023). El dato de número de viviendas en cada polígono puede obtenerse de forma automática, incluyendo, si se dispone de esa información, la cantidad de población, el valor de las edificaciones, etcétera.



Figura 20. Análisis de polígonos de potencial del incendio del Pont de Vilomara. Perímetro del incendio en blanco. Resaltado en amarillo el polígono de inicio del incendio y su primer potencial de propagación. Fuente: Medi XXI GSA.



Figura 21. Propagación inicial del incendio del Pont de Vilomara vista desde el flanco izquierdo canalizándose por el cauce de la Riera de la Santa Creu. Coordenades de la imatge: 41°41'10.4"N 1°54'05.1"E. Polígono 1 de la imagen de arriba. Fuente: Bombers de la Generalitat de Catalunya

5. Discusión

5.1. Limitaciones y desafíos

Aunque la herramienta presenta importantes beneficios, también enfrenta retos como:

- La necesidad de capacitación específica para los usuarios y adquisición de unos conocimientos mínimos de cartografía digital.
- Dependencia de datos actualizados y precisos. La calidad del resultado

- dependerá de la calidad de los datos de ingesta.
- Escenarios de incendios de sexta generación con comportamientos extremos que puedan superar las previsiones en superficie de potencial del incendio por altas tasas de propagación.
- La adaptación a sistemas operativos y tecnologías locales o la falta de infraestructura digital asociada.

Pese a todo, las herramientas digitales desempeñan un papel crucial en la gestión de emergencias, ya que pueden facilitar la coordinación, la comunicación y la toma de decisiones en situaciones críticas. Sin embargo, para ser verdaderamente útiles, deben cumplir ciertos requisitos fundamentales:

- **Facilidad de uso:** Deben estar diseñadas para ser intuitivas, permitiendo que los usuarios las adopten rápidamente incluso bajo condiciones de estrés. La interfaz debe ser clara, con funcionalidades accesibles incluso para personas con conocimientos tecnológicos limitados (Figura 22).

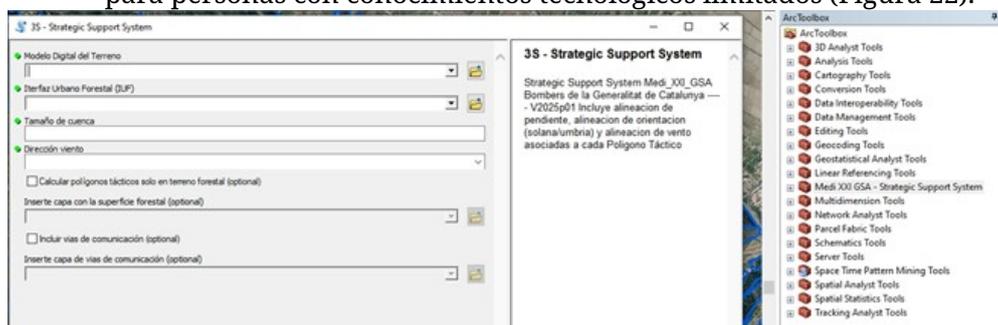


Figura 22. Interfaz de la herramienta con el clásico cuadro de diálogo de un Sistema de Información Geográfica cargada directamente desde el menú de herramientas

- **Agilidad y eficiencia:** Es esencial que las herramientas respondan de manera rápida y eficiente, proporcionando datos actualizados en tiempo real. Deben ser capaces de operar sin interrupciones en condiciones adversas o en zonas con conectividad limitada, y en breves espacios de tiempo. La respuesta del 3S da un resultado de polígonos (si las capas se preparan previamente) en tiempos que oscilan entre los 30 y los 90 segundos en todos los casos analizados.
- **Capacidad de integración:** Las herramientas deben poder integrarse con otros sistemas y plataformas existentes, favoreciendo una gestión centralizada de la emergencia. El 3S se ha desarrollado para QGIS y ArcGIS aunque se puede adaptar a cualquier otra herramienta cartográfica.

Tras varios años de test y desarrollo al ser una herramienta que se ha ido programando sin apoyo financiero externo, se han identificado también algunos limitantes que pueden condicionar la implantación de este tipo de sistemas. Se consideran los más relevantes:

- Falta de conocimiento específico por parte de los usuarios.
- Carencia de agilidad o capacidad de respuesta rápida.
- Limitaciones de infraestructura, como conectividad o recursos insuficientes.

La integración de los polígonos de potencial junto con la utilización combinada de simuladores y propagadores de incendios forestales (Figura 23) y el análisis experto de unidades como la Unitat GRAF, de la Generalitat de Catalunya, la Unitat 902 de la Generalitat Valenciana o la U.O.F.F. de Gran Canaria, entre otras, puede suponer una mejora relevante en el marco de incidentes complejos que obligan a estar pendientes de muchos factores, y reducir la carga sobre el mando estratégico.

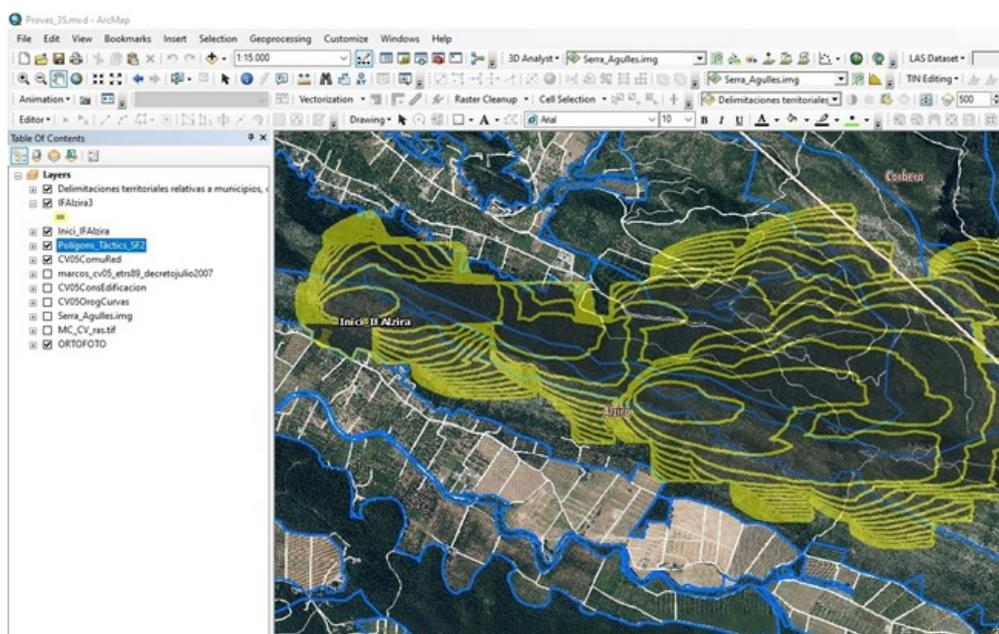


Figura 23. Polígonos tácticos en azul y simulación con FARSITE en amarillo para el incendio forestal de Alzira (València) del 14 de abril de 2023 realizado en el marco de su plan local. Fuente: Medi XXI GSA

5.2. Retos del desarrollo

Es fundamental fortalecer el sistema de recopilación de datos y promover la colaboración interinstitucional para maximizar el impacto de la metodología. En muchas zonas el acceso a la información clave está disperso y la falta de normalización cartográfica dificulta la ingesta de datos. Además, para un despliegue de la herramienta de forma generalizada se requeriría:

- Implementar programas de capacitación especializados.
- Incrementar los casos de estudio y validar la herramienta digital sobre más incidentes reales.
- Desarrollar una versión en línea que permita ejecutar la aplicación desde dispositivos móviles.
- Disponer de toda la cartografía de forma previa para poder obtener los polígonos en el inicio del incidente.
- Integrar herramientas de identificación automática de I-UF, y de simulación tradicional de forma combinada.

6. Conclusiones

Los polígonos de potencial de fuego constituyen una herramienta innovadora y efectiva para la gestión de GIF. La metodología basada en criterio experto actual es una capacidad importante para una estrategia adecuada ante grandes incendios. Si bien requiere de más casos para una validación definitiva, la herramienta cartográfica puede aportar una mayor eficiencia en la toma de decisiones. Los polígonos tácticos automatizados pueden ser una herramienta crucial para la gestión de Grandes Incendios Forestales (GIF), mejorando significativamente la capacidad de análisis y respuesta durante las operaciones. Al facilitar una visualización clara de las áreas críticas y su conectividad, estos polígonos permiten a los equipos de extinción priorizar acciones estratégicas y tácticas basadas en datos objetivos, reduciendo la incertidumbre operativa y los errores derivados de la complejidad del incidente.

En un ámbito preventivo, el uso de la herramienta Strategic Support System (3S)



supone una innovación eficaz en la planificación de medidas preventivas y mejora la capacidad de análisis territorial previo enlazándolo además con las operaciones. La identificación y delimitación de polígonos tácticos basada en análisis topográficos, meteorológicos de incendios tipo y de combustibles ayuda a minimizar la propagación del fuego y proteger áreas de alto valor ecológico y social. Esto es particularmente relevante en zonas de Interfaz Urbano-Forestal, donde las simulaciones y la integración de datos mejoran la capacidad de resiliencia del territorio.

La metodología aplicada para la generación de estos polígonos ha demostrado su capacidad para optimizar el uso de recursos humanos y materiales, asignando prioridades basadas en probabilidades de paso del fuego y en condiciones sinópticas específicas. Asimismo, su implementación contribuye a reducir los riesgos para las comunidades humanas y el medio ambiente, protegiendo infraestructuras críticas y ecosistemas vulnerables. Si bien los resultados son prometedores, la herramienta aún afronta desafíos como la mayor ingesta de casos de validación, la necesidad de capacitación técnica, la integración de datos en tiempo real y el acceso a infraestructura digital adecuada. Su aplicación dinámica y adaptable mejora significativamente la toma de decisiones, permitiendo intervenciones más seguras y eficaces. Su integración con tecnologías cartográficas avanzadas representa un paso crucial hacia la gestión moderna de incendios forestales.

7. Agradecimientos

Agradecemos a los equipos que han participado en el desarrollo y documentación de los casos de estudio, a la Generalitat de Catalunya, y al equipo de Medi XXI GSA.

8. Bibliografía

CASTELLNOU, M.; RODRIGUEZ, L.; MIRALLES, M.; 2003. Replantejant-se el futur de la prevenció i extinció d'incendis. Jornades sobre Incendis i Recerca. Solsona, 12-13 de junio

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.; PRAT-GUITART, N.; ARILLA, E.; LARRAÑAGA, A.; NEBOT, E.; CASTELLARNAU, X.; VENDRELL, J.; PALLÀS, J.; HERRERA, J.; MONTURIOL, M.; CESPEDES, 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>.

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>

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>

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.