

**Programma Interreg Italia-Francia Marittimo 2014-2020**

## **“MEDCOOPFIRE**

# **Cooperazione Mediterranea per la difesa delle foreste dagli incendi”**

**Componente T2 “Impiego a livello territoriale di strumenti innovativi  
per ottimizzare la risposta alle emergenze”**

**Attività T2.1 “Monitoraggio e gestione degli interventi con approcci  
innovativi”**

**Prodotto T.2.1.1 “Report tecnico sul tool di supporto”**

## Autori

Silvia Degli Esposti - Fondazione CIMA

Paolo Fiorucci - Fondazione CIMA

Andrea Trucchia - Fondazione CIMA

Bachisio Arca - CNR-IBE

## Elenco dei Contenuti

1	Finalità.....	5
2	Descrizione di PROPAGATOR: simulatore di incendi boschivi ad automi cellulari.....	6
2.1	Modalità di funzionamento di PROPAGATOR .....	7
2.2	Esempi di casi d'uso.....	13
2.3	BIBLIOGRAFIA.....	17
3	Il Simulatore di propagazione Web-based Wildfire Simulator (WWS) .....	20
4	Conclusioni .....	24

## Indice delle figure

Figura 1 - Diagramma di stato dell'automa adottato in Propagator. Gli stati – 1, 1, 0 stanno rispettivamente per celle non bruciate, celle in fiamme e cellule già bruciate. In un dato momento  $t$ , una cellula incombusta ha una probabilità  $p - 1 \rightarrow 1$  di bruciare. Tale probabilità è data dallo stato complessivo della realizzazione stocastica, dalle condizioni iniziali e al contorno. Nella fase temporale successiva del processo stocastico, ogni cella in fiamme sarà impostata su una cella bruciata (e quindi inattiva)..... 8

Figura 2 – Schema del funzionamento di propagator: in alto a sinistra lo scheduling che dà diversi turni alle celle man mano che vengono percorse dal fuoco. In basso a destra: varie realizzazioni stocastiche del processo confluiscono in un'unica mappa di probabilità di arrivo del fuoco..... 9

Figura 3 - Propagazione di una cella dalla  $i$ -esima (punto di innesco, in questo caso) a diverse celle  $j$ -esime dal tempo  $t = 0$  al tempo  $t = 1$ . Il diagramma di Moore di un singolo punto di innesco e' mostrato per varie realizzazioni del processo stocastico. Dato che le regole di propagazione del fuoco sono probabilistiche, ad ogni realizzazione del processo, diverse celle  $j$  sono accese dal fuoco propagato dalla cella  $i$  ..... 10

Figura 4 - In alto simulazione con PROPAGATOR di 12 ore di propagazione dell'incendio di Cisano sul Neva, mettendo come unica condizione di contrasto al fuoco le "heavy actions" per ricalcare la Via Pineta, barriera che altrimenti non sarebbe risultata dalla carta di vegetazione. In basso: perimetrazione dell'incendio ..... 14

Figura 5 - Iso-crone della simulazione PROPAGATOR di Montiferru. Ad ogni passo temporale PROPAGATOR rappresenta un campo scalare tra 0 ed 1, relativo alla

probabilità di arrivo del fuoco in un dato pixel. Ogni linea di questa figura rappresenta l'isolinea 0.5 per una certa ora di avanzamento del fronte (da giallo ad arancio). In blu si rappresenta l'area bruciata acquisita da satellite ..... 15

Figura 6 - Rate of Spread (velocità di propagazione) media. In ogni cella, il fuoco propaga con una certa velocità, per ognuna delle N realizzazioni. La media rappresenta una mappa che ci informa di come il fronte abbia accelerato o decelerato lungo il suo avanzamento ..... 16

Figura 7 - Fireline Intensity (intensità lineare di fiamma) media. In ogni cella, il fuoco propaga con una certa intensità, per ognuna delle N realizzazioni. La media rappresenta una mappa che ci informa di quanto intenso sia stato il fronte nel suo avanzamento. 17

Figura 8 - Perimetro simulato (rosso) e reale (giallo) del primo step dell'incendio del Montiferru (24/07/2021). Le linee rosse indicano gli avanzamenti dell'incendio simulato per ogni mezz'ora di propagazione. Il punto di insorgenza è indicato dal punto arancione. .... 21

Figura 9 - Mappa della fireline intensity (kw/m) del primo step dell'incendio del montiferru (24/07/2021). Valori alti dell'intensità, superiori a 25000 kw/m, si verificano nelle aree forestali in quota (nord-ovest) caratterizzate da carichi di combustibile elevati e continuità verticale della vegetazione..... 22

*Figura 10 - Perimetro simulato (rosso) e reale (giallo) dell'incendio di Cisano sul Neva (06/09/2021). Le linee rosse indicano gli avanzamenti dell'incendio simulato per ogni mezz'ora di propagazione. Il punto di insorgenza è indicato dal puntatore rosso 22*

Figura 11 - Mappa del tempo di arrivo delle fiamme nei diversi punti dell'incendio di Cisano sul Neva (06/09/2021), a partire dal punto di insorgenza (indicato dal punto arancione)..... 23

# 1 Finalità

Il presente documento, prodotto T.2.1.1 “Report tecnico sul tool di supporto” descrive i tools che sono stati implementati e/o aggiornati nell’ambito del progetto Medcoopfire e del progetto Medstar per la simulazione del comportamento del fronte di fiamma.

In particolare, è presentato nel dettaglio il funzionamento del simulatore PROPAGATOR implementato da Fondazione CIMA nell’ambito del progetto MEDCOOPFIRE ed è presentata una sintesi relativa al simulatore di propagazione Web-based Wildfire Simulator (WWS) realizzato da CNR-IBE nell’ambito del progetto MED-Star e utilizzato nell’ambito del progetto MEDCOOPFIRE capitalizzando i risultati ottenuti. Per una descrizione di dettaglio del simulatore WWS si rimanda al report T2.2.2 del progetto MED-Star.

## 2 Descrizione di PROPAGATOR: simulatore di incendi boschivi ad automi cellulari.

PROPAGATOR [1,15] è un modello stocastico ad automi cellulari per la simulazione della propagazione degli incendi boschivi, concepito come metodo rapido per la valutazione del rischio di incendio. Il modello utilizza informazioni ad alta risoluzione come la topografia e la copertura vegetale, considerando diversi tipi di vegetazione. Ciascun tipo di vegetazione è infatti caratterizzato da diversi valori di suscettività al fuoco e di velocità del fronte di fiamma. I parametri di input del modello sono la velocità e la direzione del vento, il contenuto di umidità della necromassa e il punto di accensione. Il modello permette di simulare anche le condizioni di "spotting". Le condizioni al contorno possono essere selezionate dall'utente o richiamate da modello meteorologico (per quanto riguarda il vento) e da RISICO (per quanto riguarda l'umidità della necromassa).

Ciascuna simulazione può includere l'effetto di diverse strategie antincendio, come azioni di contrasto a terra con linee d'acqua o taglio di vegetazione, ed azioni di contrasto aereo con canadair ed elicotteri. La duttilità del modello facilita la rappresentazione dello scenario di incendio forestale simulato. La probabilità di propagazione dell'incendio dipende dal tipo di vegetazione, dalla pendenza, dalla direzione e dalla velocità del vento e dal contenuto di umidità del combustibile. La velocità di propagazione dell'incendio viene determinata attraverso l'adozione di un modello di velocità di propagazione "Rate of Spread" di letteratura. PROPAGATOR simula realizzazioni indipendenti di un processo stocastico di propagazione dell'incendio e, a ogni time-step, fornisce come output una mappa che rappresenta la probabilità di ogni cella del dominio di essere colpita dall'incendio. Queste probabilità si ottengono calcolando la frequenza relativa di accensione di ogni cella tra tutte le simulazioni effettuate.

Una simulazione di 24-48 ore può essere effettuata nell'ordine di qualche minuto tramite la piattaforma MEDSTAR. Ogni simulazione permette di visualizzare le isocrone orarie del fronte di fiamma, la mappa di probabilità di arrivo del fuoco per ogni ora di simulazione, le mappe di velocità ("Rate of Spread") e di intensità lineare ("Fireline Intensity") del fronte di fiamma, sia massima sia media, per ogni pixel del dominio.

## 2.1 Modalità di funzionamento di PROPAGATOR

I processi fisici che influenzano la propagazione degli incendi sono complessi: gli effetti della pendenza (orografia), delle condizioni del vento e dell'umidità del combustibile si combinano, determinando l'evoluzione dell'incendio nello spazio e nel tempo. Questi fattori rendono gli incendi dei fenomeni multi-scala, multi-fisica e non lineari. La formulazione di modelli matematici efficienti e affidabili costituisce quindi una sfida, così come la implementazione computazionale dei modelli adottati.

In letteratura ci sono molti approcci e modelli diversi dedicati a questo compito. Tali approcci di modellazione sono solitamente divisi in tre rami principali [1][12][13][14]:

- 1) modelli empirici e semi-empirici, basati su leggi di propagazione del fuoco derivate statisticamente;
- 2) modelli macroscopico-deterministici, in cui la propagazione dell'incendio è modellata in un continuo, principalmente utilizzando tecniche di fluidodinamica computazionale accoppiate a modelli atmosferici, di trasferimento di calore e di combustione;
- 3) modelli stocastici a reticolo o a griglia, in cui le quantità di interesse sono descritte adottando una discretizzazione nello spazio e nel tempo, e affrontando la propagazione del fronte di fuoco da una cella a quelle vicine adottando regole di evoluzione localizzate dettagliate che comprendono la fisica sottostante al livello di risoluzione desiderato.

Come descritto da Trucchia et al. [1], il modello Propagator è un modello stocastico ad automi cellulari per la simulazione della propagazione degli incendi boschivi. Si basa su un'implementazione *raster*, che discretizza lo spazio in una griglia composta da celle quadrate di 20 metri di lato, con informazioni di elevazione e copertura vegetale.

Il modello prende le informazioni statiche dal DEM e dai raster di copertura della vegetazione, mentre le condizioni al contorno (dinamiche di vento medio sul dominio ed FFMC, umidità della necromassa fina) sono processate in formato JSON. Tali condizioni al contorno saranno usate come input per le regole probabilistiche di avanzamento del fronte di fiamma. Le condizioni di umidità della necromassa e quelle del vento possono essere fornite dall'utente o ricavate rispettivamente dal modello RISICO e dal modello di Numerical Weather Prediction (NWP). Tali condizioni al contorno sono da considerarsi omogenee su tutto il dominio di calcolo per ogni passo temporale.

Per ogni passo temporale, ogni cella è caratterizzata da uno stato, che può essere bruciante (stato 1), già bruciato (stato 0) o non bruciato (stato -1): una cella in stato non bruciato può diventare una cella in fiamme, a seconda della probabilità di essere

accesa, o può rimanere nello stesso stato; una cella in stato di combustione diventa una cella bruciata dopo un passo temporale; una cella in stato già bruciato rimane nello stesso stato fino alla fine della simulazione. La Figura 1 rappresenta un semplice schema dei possibili cambiamenti negli stati della cella. Quando il fuoco si propaga da una cella all'altra, a quest'ultimo viene dato un tempo specifico per il fronte di fuoco per attraversarlo completamente, descritto più specificamente nelle parti seguenti. Quando questo tempo trascorre, la cellula cambia il suo stato da non bruciato (-1) a bruciante (1), e cercherà quindi di propagare il fuoco alle cellule incombuste adiacenti. In termini operativi, il passo temporale calcolato  $\Delta t$  per il cambiamento di stato viene aggiunto di conseguenza a uno *scheduler* che gestisce il meccanismo di propagazione del fuoco dell'automa cellulare.

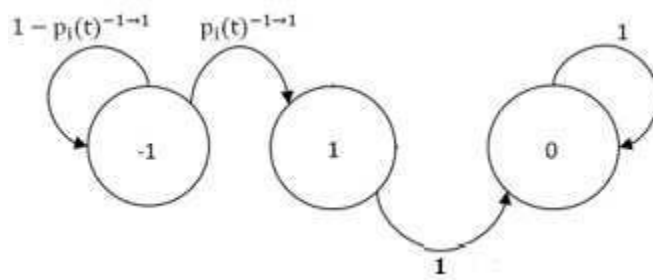


Figura 1 - Diagramma di stato dell'automa adottato in Propagator. Gli stati - 1, 1, 0 stanno rispettivamente per celle non bruciate, celle in fiamme e cellule già bruciate. In un dato momento  $t$ , una cellula incombusta ha una probabilità  $p - 1 \rightarrow 1$  di bruciare. Tale probabilità è data dallo stato complessivo della realizzazione stocastica, dalle condizioni iniziali e al contorno. Nella fase temporale successiva del processo stocastico, ogni cella in fiamme sarà impostata su una cella bruciata (e quindi inattiva).



## Probabilistic rules

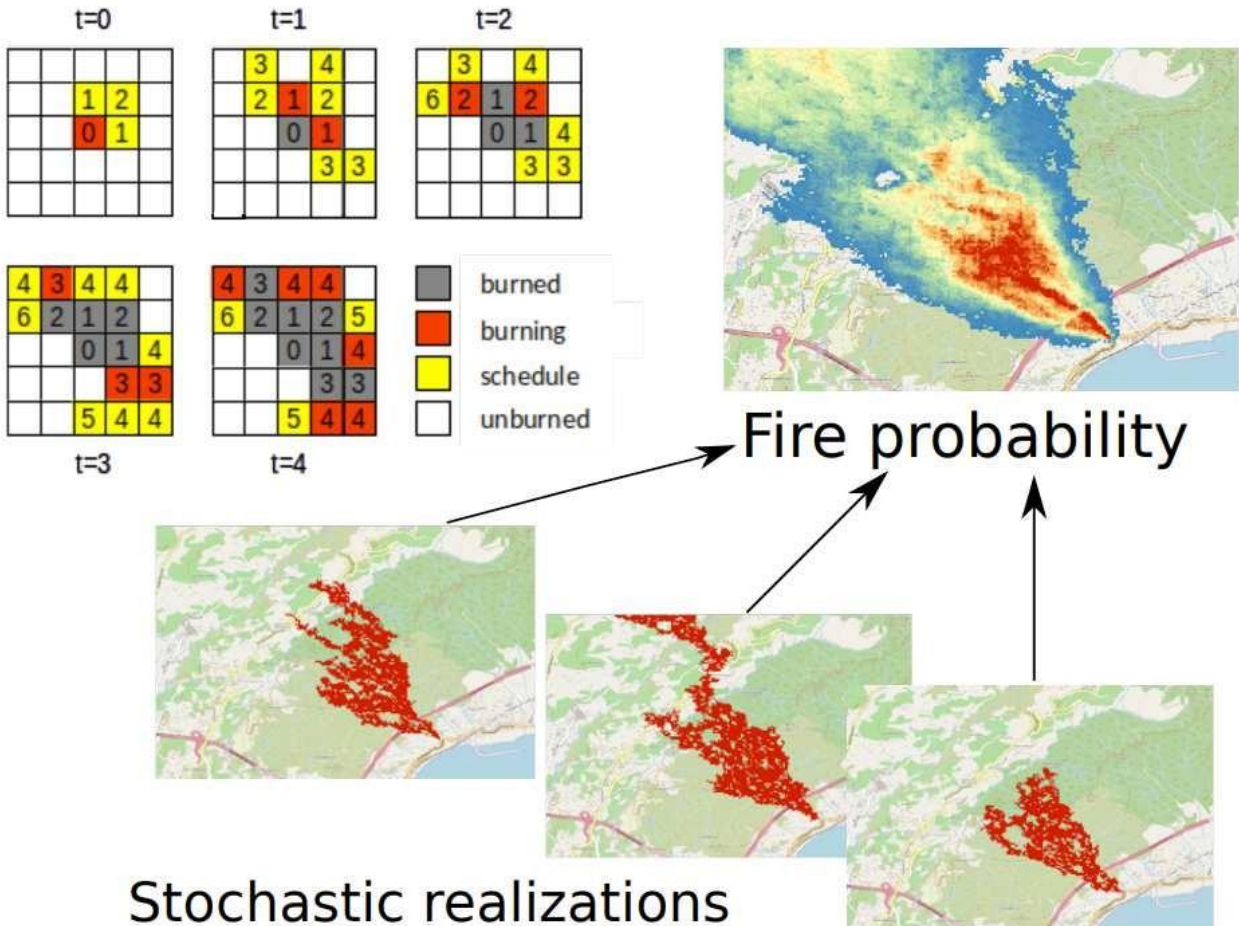


Figura 2 – Schema del funzionamento di propagator: in alto a sinistra lo scheduling che dà diversi turni alle celle man mano che vengono percorse dal fuoco. In basso a destra: varie realizzazioni stocastiche del processo confluiscono in un'unica mappa di probabilità di arrivo del fuoco.

La propagazione del fuoco è modellata come un processo di contaminazione tra celle adiacenti del dominio considerato; la probabilità che il fuoco si diffonda da una cellula a uno dei suoi quartieri,  $p_{ij}$ , viene calcolata partendo dalla probabilità nominale di propagazione del fuoco (denominata  $p_n$  nel seguito), che viene poi modificata considerando diversi fattori. Tali fattori tengono conto della topografia, del vettore del vento e del contenuto di umidità del carburante. Inoltre, l'evoluzione nel tempo dell'incendio è modellata combinando la velocità nominale di diffusione del fuoco ( $v_n$  nel seguito) e gli stessi fattori di influenza, mediante una implementazione di un modello di Rate of Spread (RoS). Per ogni cella della simulazione, corrispondente ad un punto del dominio spaziale, il modello calcola la probabilità  $u(x_p, t)$  di essere bruciato al tempo  $t$  e nello spazio  $x$  valutando la frequenza di incendio per ogni cella, sulla base di 100

simulazioni stocastiche e ogni simulazione viene eseguita per lo stesso punto di innesco e condizioni di vento (Figura 2).

L'automa cellulare viene applicato sul vicinato di Moore (vedi Figura 3), un reticolo quadrato bidimensionale composto da una cella centrale, la cellula  $i$ -esima, dalla quale si propaga il fuoco, e le otto celle che la circondano, che possono essere accese per contatto con la cellula  $i$ -esima. La propagazione del fuoco viene calcolata stocasticamente considerando il vettore che va dal centro della cella  $i$ -esima a quello delle cellule vicine, la pendenza tra le celle di partenza della propagazione ( $i$ ) e quelle di arrivo e, l'umidità della necromassa.

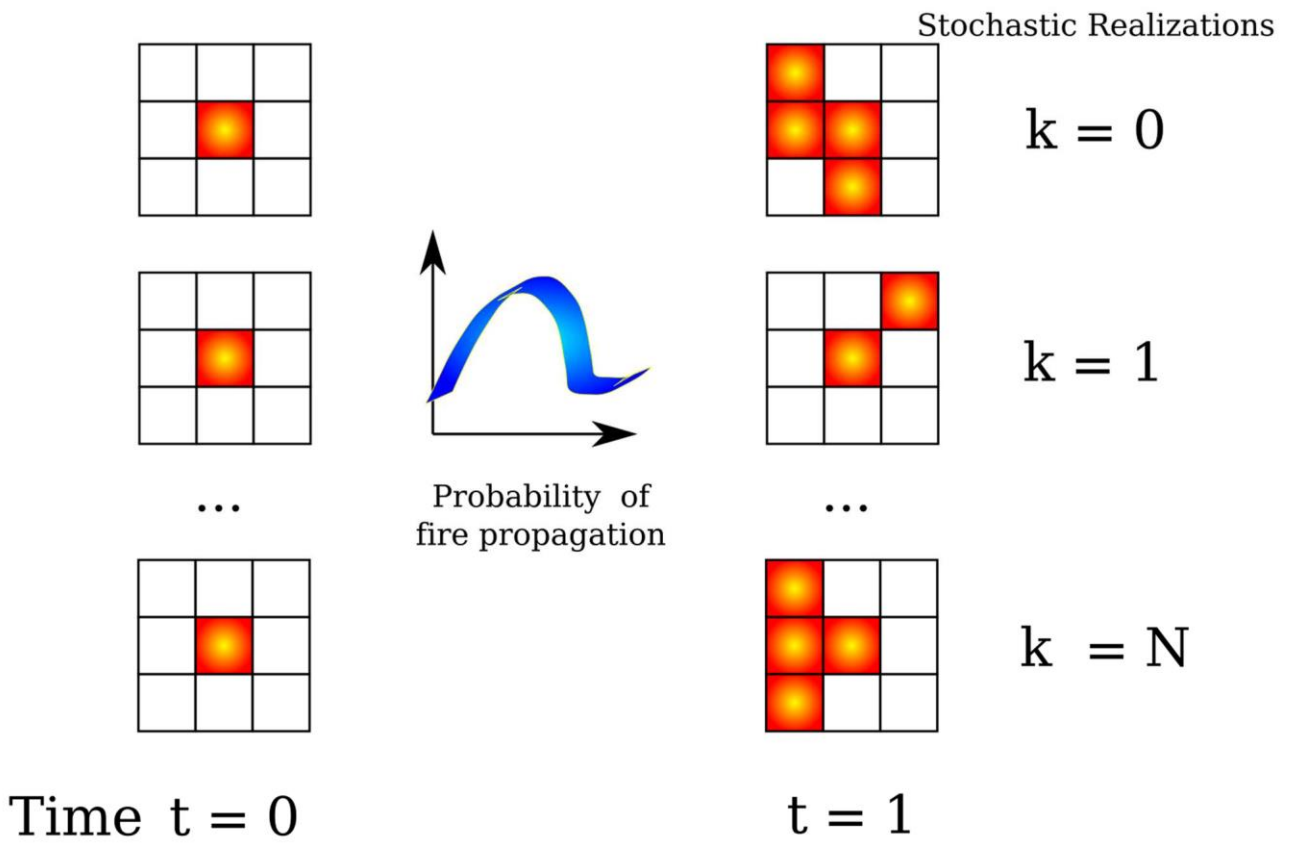


Figura 3 - Propagazione di una cella dalla  $i$ -esima (punto di innesco, in questo caso) a diverse celle  $j$ -esime dal tempo  $t = 0$  al tempo  $t = 1$ . Il diagramma di Moore di un singolo punto di innesco e' mostrato per varie realizzazioni del processo stocastico. Dato che le regole di propagazione del fuoco sono probabilistiche, ad ogni realizzazione del processo, diverse celle  $j$  sono accese dal fuoco propagato dalla cella  $i$ .

Ogni cella è caratterizzata da un tipo di vegetazione: PROPAGATOR adotta un modello di combustibile personalizzato semplificato gestibile con sette tipi di combustibile disponibili corrispondenti a sette diversi tipi di vegetazione. I tipi di combustibile considerati sono i seguenti: latifoglie, arbusti, praterie, conifere soggette al fuoco, aree agroforestali, foreste non suscettibili al fuoco ed aree non vegetate.

Il fuoco si propaga da una cella  $i$ -esima alla cella vicina  $j$  con una probabilità  $p_{ij}$ , chiamata Fire Spread Probability, che dipende fortemente dai tipi di vegetazione coinvolti.  $p_{ij}$  è anche influenzato dalla pendenza tra le due celle, dall'effetto del vento (direzione e velocità) e dal contenuto di umidità del combustibile della cella  $j$ -esima. Il modello prende in considerazione la vegetazione della cellula che sta bruciando e le cellule in cui il fuoco può propagarsi ( $j$ ) e modella come il fuoco in un certo tipo di vegetazione può propagarsi ad altre tipologie vegetali, o anche allo stesso tipo di vegetazione (in caso di due celle contigue caratterizzate dalla stessa copertura vegetale). Questi valori di probabilità sono dati in input attraverso una tabella di probabilità di propagazione del fuoco, che considera tutte le possibili combinazioni "partenza-arrivo" tra i diversi tipi di vegetazione e copertura del suolo. La Fire Spread Probability nominale,  $p_n$  rappresenta la possibilità per la cella  $i$ -esima caratterizzata da una certa copertura vegetale, di accendere una cella " $j$ " adiacente, caratterizzata dalla stessa, o un'altra, copertura vegetale, senza tenere conto di altri fattori al di fuori della vegetazione. I valori  $p_n$  sono stati definiti empiricamente, secondo una calibrazione continua e approfondita attraverso tutto lo sviluppo del modello, anche usando risultati dalla mappatura della suscettibilità statica al fuoco [2]. La pendenza e la velocità e la direzione del vento agiscono come un fattore che modifica il valore iniziale di  $p_n$ , aumentando o diminuendo il valore nominale a seconda della direzione di propagazione. L'influenza della topografia è presa in considerazione attraverso la pendenza tra le due celle. La pendenza aumenta la probabilità di propagazione  $p_n$  quando la propagazione avviene in salita, e diminuisce  $p_n$  se la pendenza diminuisce nella direzione di propagazione (caso in discesa). L'influenza del vento viene presa in considerazione considerando la velocità del vento e la sua direzione (entrambe considerate omogenee nel dominio) rispetto alla direzione dalla cella in fiamme e da quelle adiacenti. Ad ogni passo temporale, il valore del vento per ogni cella è perturbato sia in grandezza che in direzione, per modellare la stocasticità e la turbolenza. La magnitudo del vento viene modificata moltiplicando in ogni cella per un fattore di rumore uniforme, distribuito come  $U[0.8,1.2]$ , dove  $U[a,b]$  sta per la distribuzione uniforme con supporto in  $[a,b]$ . La direzione del vento è perturbata sommando un rumore uniforme  $U[-11.25^\circ,11.25^\circ]$ . L'influenza è significativa solo se la velocità del vento è piuttosto elevata: nel caso a bassa velocità, il fattore di vento non modifica la probabilità di propagazione. Tuttavia, quando la velocità del vento è sufficientemente alta, ha di norma un grande impatto sulla propagazione. La direzione del vento gioca un ruolo chiave nel processo complessivo perché la probabilità di

bruciare aumenta quando la direzione di propagazione è allineata con la direzione del vento, mentre diminuisce quando le direzioni sono opposte. L'effetto del contenuto di umidità del combustibile sulla probabilità di diffusione del fuoco è stato modellato come un fattore  $e_m$ , che moltiplica la probabilità nominale  $p_n$ . Questo fattore è stato implementato come descritto da Burgan e Rothermel in [3]. Varia nell'intervallo [0,1] ed è calcolato in funzione del "Fuel Moisture Ratio", cioè l'umidità del combustibile morto rispetto all'umidità di estinzione. Per semplicità, il valore di 0,3 è stato utilizzato per l'umidità di estinzione per una qualsiasi delle classi di vegetazione applicando una stima conservativa [4].

La propagazione del fuoco tra due celle si può riassumere nella formulazione seguente:

$$p_{ij} = (1 - (1 - p_n)^{\alpha_{wh}}) e_m$$

Dove  $p_{ij}$ ,  $p_n$  ed  $e_m$  sono i valori appena descritti di probabilità di propagazione, probabilità nominale ed effetto dell'umidità della necromassa, ed  $\alpha_{wh}$  è il parametro che rappresenta i contributi di vento e pendenza nella propagazione dalla cella  $i$  alla  $j$  [1].

Quando una cella "di arrivo"  $j$  viene accesa dalla cella "di partenza"  $i$ , il tempo necessario per la propagazione del fuoco è di importanza fondamentale per una corretta rappresentazione della dinamica temporale dell'incendio. Tale tempo di transizione è modellato dividendo la distanza  $d$  che intercorre tra le celle di partenza e di arrivo ( $i, j$ ) per la velocità di propagazione "Rate of Spread (RoS)"  $v_{prop}$  e per il fattore di umidità del combustibile  $f_m$ , che viene calcolato utilizzando la formulazione proposta da Marino et al. [5]. Il Rate of Spread  $v_{prop}$  viene calcolato partendo dal  $v_n$  nominale, ossia una velocità di base che dipende solo dal tipo di vegetazione, per poi modificarlo tenendo conto di orografia (pendenza) e vento. Gli effetti del vento e della pendenza (rispettivamente  $K_w$  e  $K_\phi$ ) sono stati valutati attraverso le formulazioni proposte da Sun et al. [6]. La velocità di propagazione (RoS) viene quindi valutata moltiplicando la velocità nominale di propagazione del fuoco  $v_n$  per i due fattori,  $K_w$  e  $K_\phi$ . L'intensità lineare di fiamma, "Fireline intensity" è quindi ottenuta moltiplicando la velocità di propagazione con il "Lower Heating Value" (LHV) ed il "Fuel Load" della cella in esame.

Ogni ora di simulazione, il modello valuta la frequenza di fuoco di ogni cella del dominio, combinando i risultati delle 100 simulazioni; Si ottiene quindi per ogni pixel, per ogni ora di incendio simulato, una quantità tra 0 ed 1 che corrisponde alla probabilità per l'incendio di arrivare alla cella in questione ad un dato tempo. Si valutano inoltre i valori medi e massimi di Rate of Spread (RoS) ed intensità lineare di fiamma che sono stati simulati per ogni cella del dominio, mediando tra le realizzazioni del processo stocastico.

Sono state implementate nel modello anche diverse azioni antincendio per poter rappresentare un vasto insieme di casi studio e scenari.

- È possibile specificare delle linee d'acqua, le quali vengono implementate nel modello computazionale impostando il contenuto di umidità fine del combustibile a un valore prescritto  $\mu_{wI} = 0,8$  nelle celle del dominio interessate, in modo che la probabilità di propagazione del fuoco sia fortemente ridotta;
- Si possono anche implementare di attrezzature pesanti modificando i valori del tipo di vegetazione in "Aree non vegetate" nelle aree dove si vogliono simulare questi interventi. In questo modo il fuoco non può propagarsi in quelle aree.
- Si possono anche implementare azioni tramite mezzi aerei (canadair o elicottero), ottenendo dei risultati simili alle linee d'acqua ma con diversa conformazione dell'area interessata in modo da simulare la conformazione di uno sgancio di acqua.

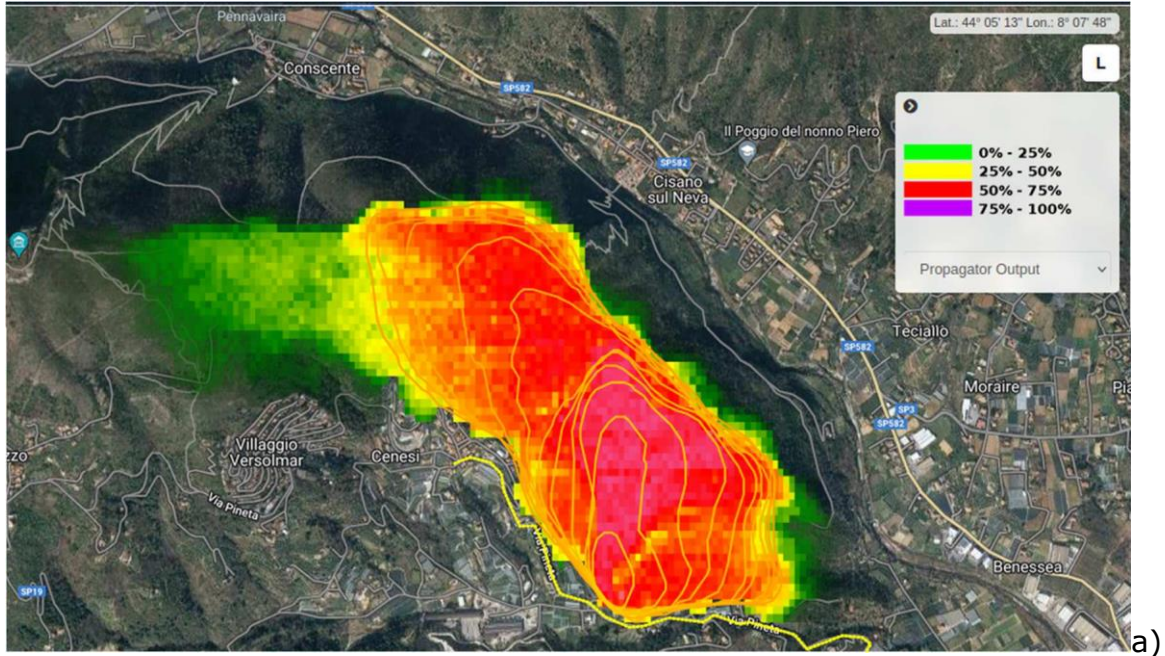
All'interno di PROPAGATOR è stato implementato anche il fenomeno di "fire spotting". Attualmente la formulazione empirica di Alexandridis [16] è implementata, mentre recenti studi [18] hanno mostrato la fattibilità dell'adozione di un modello di spotting più fisico, come quello di Trucchia et al. [17] all'interno di PROPAGATOR.

## 2.2 Esempi di casi d'uso

CISANO SUL NEVA – 6 Settembre 2021

Incendio sviluppatosi molto vicino all'interfaccia urbano forestale, dove sono stati impegnati circa 100 operatori tra vigili del fuoco e volontari e cinque mezzi aerei. Sono state simulate 12 ore di propagazione del fuoco (vedi Figura 4) usando i dati della vicina Stazione Meteorologica per avere i dati di vento.





*Figura 4 - In alto simulazione con PROPAGATOR di 12 ore di propagazione dell'incendio di Cisano sul Neva, mettendo come unica condizione di contrasto al fuoco le "heavy actions" per ricalcare la Via Pineta, barriera che altrimenti non sarebbe risultata dalla carta di vegetazione. In basso: perimetrazione dell'incendio.*



## MONTIFERRU – 24 Luglio 2021

L'incendio di Montiferru, che dopo aver circondato Santu Lussurgiu si è mosso verso nordovest, minacciando Cuglieri e causando centinaia di sfollati, ha interessato un'area di più di 11000 ettari.

Le seguenti figure (Figura 5, Figura 6 e Figura 7) rappresentano una simulazione di PROPAGATOR (36 ore) assieme all'area interessata dal fuoco.

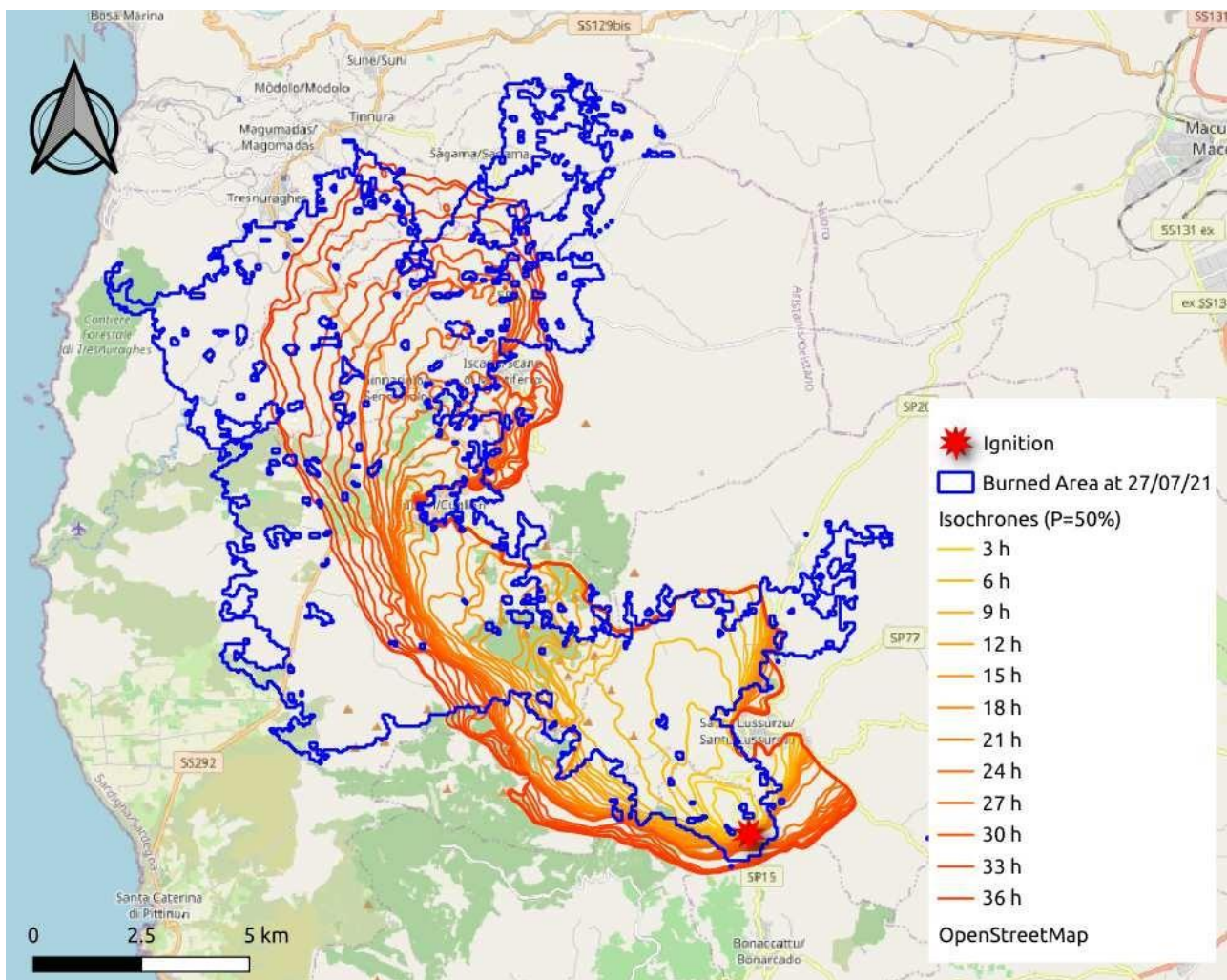


Figura 5 - Iso-crone della simulazione PROPAGATOR di Montiferru. Ad ogni passo temporale PROPAGATOR rappresenta un campo scalare tra 0 ed 1, relativo alla probabilità di arrivo del fuoco in un dato pixel. Ogni linea di questa figura rappresenta l'isolinea 0.5 per una certa ora di avanzamento del fronte (da giallo ad arancio). In blu si rappresenta l'area bruciata acquisita da satellite.

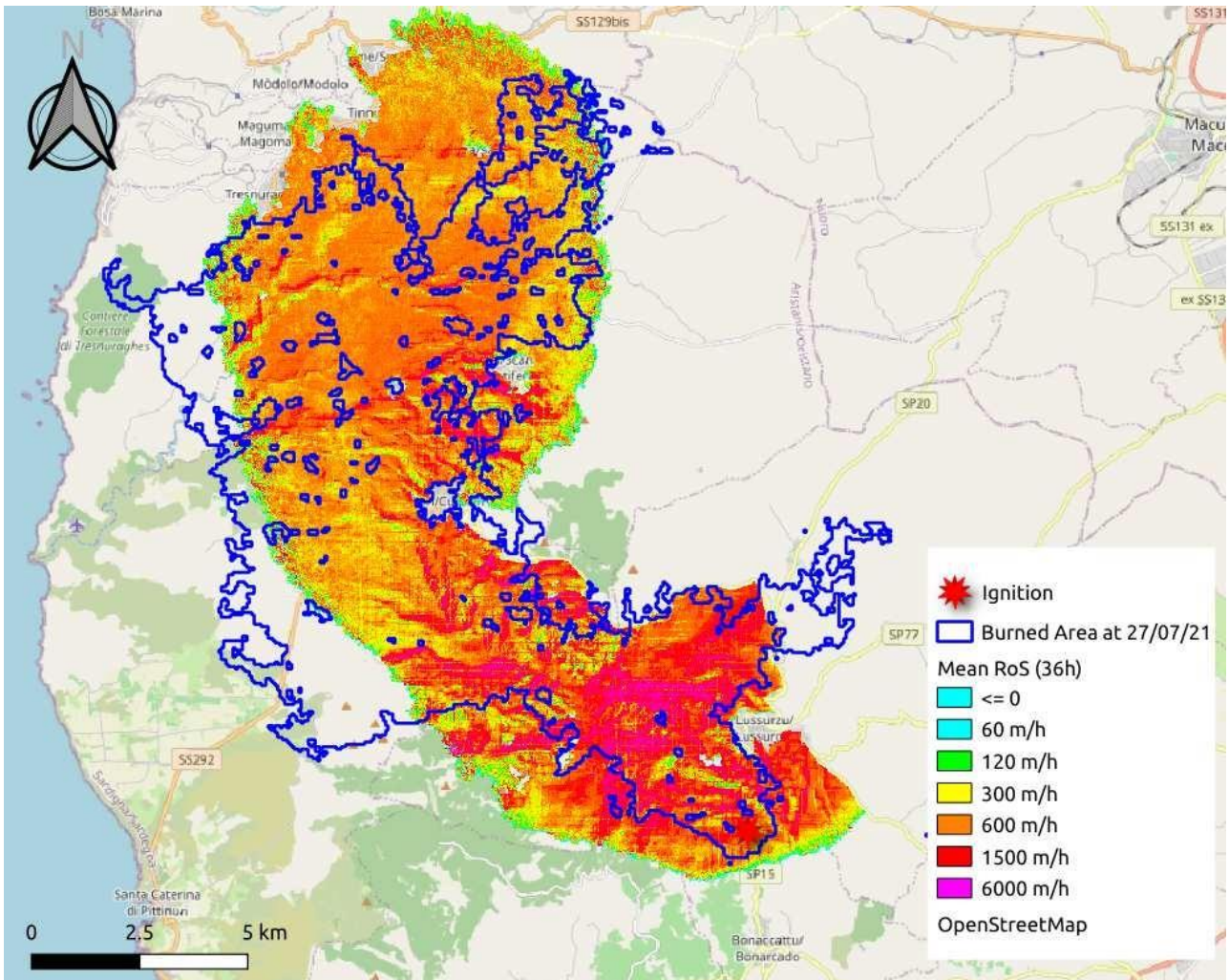


Figura 6 - Rate of Spread (velocità di propagazione) media. In ogni cella, il fuoco propaga con una certa velocità, per ognuna delle  $N$  realizzazioni. La media rappresenta una mappa che ci informa di come il fronte abbia accelerato o decelerato lungo il suo avanzamento.



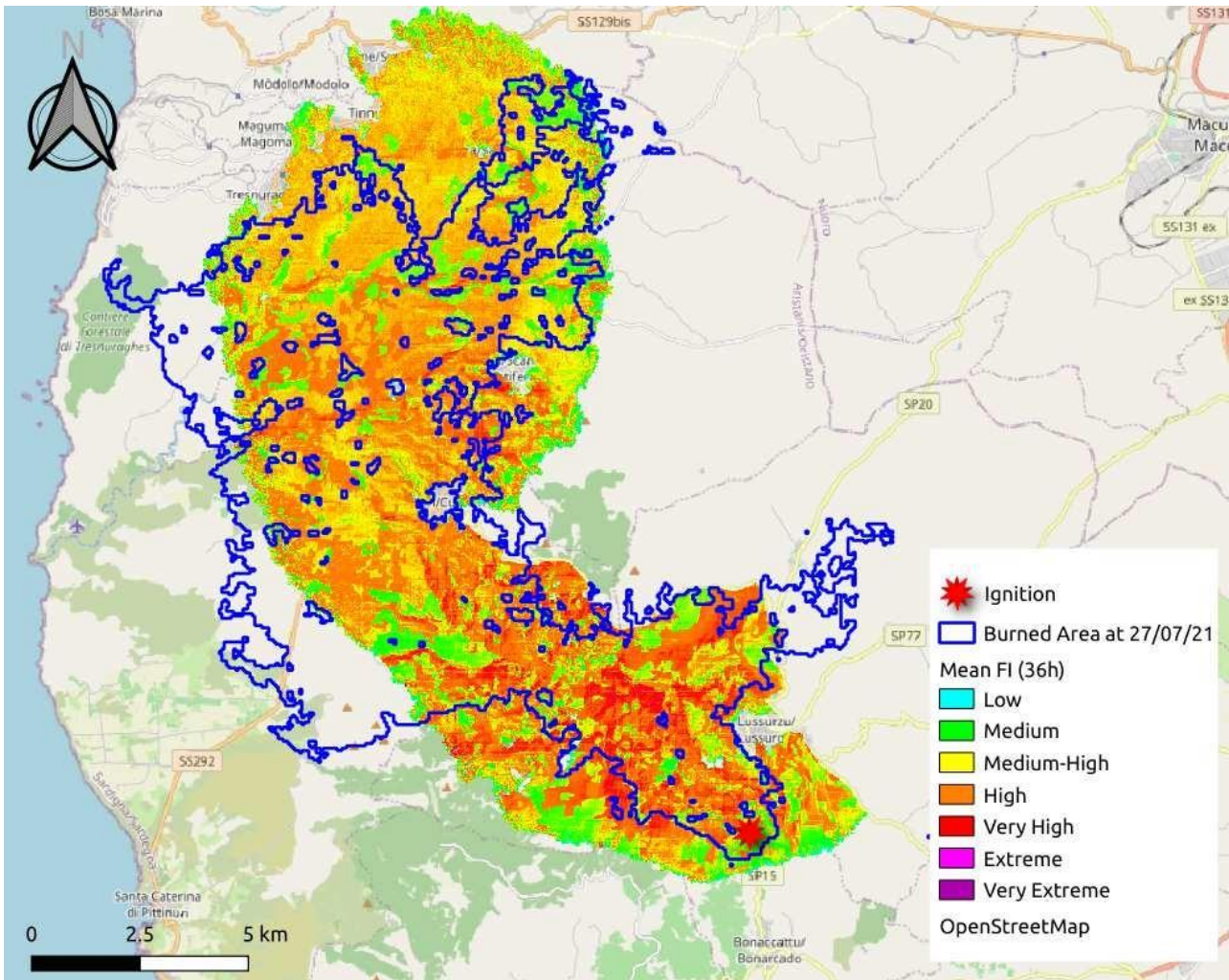


Figura 7 - Fireline Intensity (intensità lineare di fiamma) media. In ogni cella, il fuoco propaga con una certa intensità, per ognuna delle  $N$  realizzazioni. La media rappresenta una mappa che ci informa di quanto intenso sia stato il fronte nel suo avanzamento.

## 2.3 BIBLIOGRAFIA

[1] Trucchia, A.; D'Andrea, M.; Baghino, F.; Fiorucci, P.; Ferraris, L.; Negro, D.; Gollini, A.; Severino, M. PROPAGATOR: An Operational Cellular-Automata Based Wildfire Simulator. *Fire* 2020, 3, 26. <https://doi.org/10.3390/fire3030026>

[2] Tonini, M.; D'Andrea, M.; Biondi, G.; Degli Esposti, S.; Trucchia, A.; Fiorucci, P. A Machine Learning-Based Approach for Wildfire Susceptibility Mapping. The Case Study of the Liguria Region in Italy. *Geosciences* 2020, 10, 105.

- [3] Burgan, R.E.; Rothermel, R.C. BEHAVE: Fire Behavior Prediction and Fuel Modeling System, Fuel Subsystem; U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station: Fort Collins, CO, USA, 1984.
- [4] Anderson, H.E. Aids to Determining Fuel Models for Estimating Fire Behavior; General Technical Report INT-122; U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station: Ogden, UT, USA, 1982.
- [5] Marino, E.; Dupuy, J.L.; Pimont, F.; Guijarro, M.; Hernando, C.; Linn, R. Fuel bulk density and fuel moisture content effects on fire rate of spread: A comparison between FIRETEC model predictions and experimental results in shrub fuels. *J. Fire Sci.* 2012, 30, 277–299.
- [6] Sun, T.; Zhang, L.; Chen, W.; Tang, X.; Qin, Q. Mountains Forest Fire Spread Simulator Based on Geo-Cellular Automaton Combined With Wang Zhengfei Velocity Model. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 2013, 6, 1971–1987.
- [7] Sorensen, T. A Method of Establishing Groups of Equal Amplitudes in Plant Sociology Based on Similarity of Species Content and Its Application to Analyses of the Vegetation on Danish Commons. *K. Dan. Vidensk. Selsk. Biol. Skr.* 1948, 5, 1–34.
- [8] Arca, B.; Ghisu, T.; Casula, M.; Salis, M.; Duce, P. A web-based wildfire simulator for operational applications. *Int. J. Wildland Fire* 2019, 28, 99–112.
- [9] Agresti, A. *An Introduction to Categorical Data Analysis*; Wiley Series in Probability and Statistics; Wiley Publishing: Hoboken, NJ, USA, 2007.
- [10] Mallinis, G.; Galidaki, G.; Gitas, I. A Comparative Analysis of EO-1 Hyperion, Quickbird and Landsat TM Imagery for Fuel Type Mapping of a Typical Mediterranean Landscape. *Remote Sens.* 2014, 6, 1684–1704.
- [11] Montealegre, A.L.; Lamelas, M.T.; Tanase, M.A.; De la Riva, J. Forest Fire Severity Assessment Using ALS Data in a Mediterranean Environment. *Remote Sens.* 2014, 6, 4240–4265
- [12] Sullivan, A.L. Wildland surface fire spread modeling, 1990–2007. 1: Physical and quasi-physical models. *Int. J. Wildland Fire* 2009, 18, 349–368.
- [13] Sullivan, A. Wildland surface fire spread modeling, 1990–2007. 2: Empirical and quasi-empirical models. *Int. J. Wildland Fire* 2009, 18, 369–386.
- [14] Sullivan, A. Wildland surface fire spread modeling, 1990–2007. 3: Simulation and mathematical analogue models. *Int. J. Wildland Fire* 2009, 18, 387–403.

[15] Baghino, F.; Trucchia, A.; D'Andrea, M.; Fiorucci, P. PROPAGATOR, a Cellular Automata Model for Fast Wildfire Simulations: Latest Improvements and Future Perspectives. Environ. Sci. Proc. 2022, 17, 60. <https://doi.org/10.3390/environsciproc2022017060>

[16] A. Alexandridis, D. Vakalis, C.I. Siettos, G.V. Bafas, A cellular automata model for forest fire spread prediction: The case of the wildfire that swept through Spetses Island in 1990, Applied Mathematics and Computation, Volume 204, Issue 1, 2008, Pages 191-201, ISSN 0096-3003, <https://doi.org/10.1016/j.amc.2008.06.046>.

[17] Trucchia, A., Egorova, V., Butenko, A., Kaur, I., and Pagnini, G.: RandomFront 2.3: a physical parameterisation of fire spotting for operational fire spread models – implementation in WRF-SFIRE and response analysis with LSFIRE+, Geosci. Model Dev., 12, 69–87, <https://doi.org/10.5194/gmd-12-69-2019>, 2019.

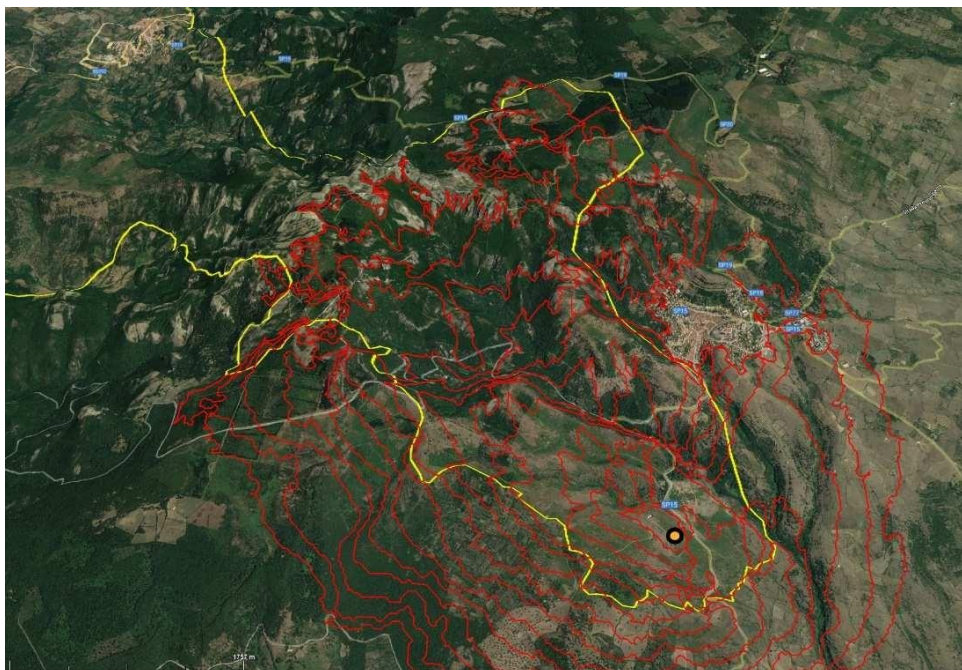
[18] López-De-Castro, M.; Trucchia, A.; Fiorucci, P.; Pagnini, G. Physical and Non-Physical Fire-Spotting Models: A Comparison Study by a Wildfire Simulator Based on a Cellular Automata Approach. Environ. Sci. Proc. 2022, 17, 27. <https://doi.org/10.3390/environsciproc2022017027>

## 3 Il Simulatore di propagazione Web-based Wildfire Simulator (WWS).

L'applicazione dei simulatori di propagazione durante gli incendi in atto potrebbe consentire una più facile valutazione del comportamento e della severità del fuoco, valutandone le potenzialità di propagazione per un orizzonte temporale definito e consentendo in tal modo di evidenziare aree, ad esempio di interfaccia, che necessitano di specifici interventi di lotta o di messa in sicurezza. E' con questa filosofia che il CNR-IBE ha sviluppato un simulatore di propagazione per applicazioni in real-time, che rappresenta anche la capitalizzazione di precedenti esperienze sviluppate nell'ambito del PO Marittimi, ovvero i Progetti Proterina-Due e Proterina-C (Programma Interreg Italia-Francia Marittimo 2007-2013). In questi precedenti progetti l'IBE ha svolto una intensa attività di raccolta dati e realizzazione di mappe di vegetazione e combustibile, di calibrazione e validazione dei modelli di combustibile e di modelli di propagazione, e inoltre ha sviluppato la prima versione di un modello per il downscaling dei campi di vento. Nell'ambito dei progetti MedSTAR e Medcoopfire si è provveduto all'ulteriore sviluppo della catena modellistica necessaria per la previsione in real-time della propagazione degli incendi boschivi, attraverso le seguenti fasi: sviluppo e parallelizzazione del codice; completamento dello sviluppo dell'algoritmo multigrid per la previsione dei campi di vento; sviluppo di funzionalità per la previsione probabilistica della propagazione; sviluppo di una versione del simulatore in grado di operare nelle altre regioni del programma PO Marittimo; sviluppo dell'interfaccia grafica e delle funzionalità per l'accesso online del simulatore; sviluppo di un codice per la previsione del fuoco di chioma; test di funzionamento e validazione degli algoritmi e della catena modellistica, condotti su un set di dati meteo e di incendi boschivi realmente verificatisi durante le stagioni 2019, 2020 e 2021. La validazione del simulatore è stata condotta su un set di casi di studio rappresentati da incendi realmente verificatisi, in Sardegna e nelle altre aree di programma, nel corso delle ultime stagioni degli incendi. Il simulatore ha dimostrato le capacità di fornire previsioni della propagazione e del comportamento degli incendi in sostanziale accordo con i perimetri reali e un costo computazionale adatto per applicazioni in real-time. Il sistema fornisce in output i seguenti tematismi utili per la caratterizzazione del comportamento dell'incendio: perimetro simulato, velocità di propagazione, intensità del fronte di fiamma, lunghezza di fiamma, tempo di arrivo, mappa del combustibile, mappa delle aree interessate da fuoco di chioma, mappa dei campi di vento, mappa dell'umidità del combustibile. Tra questi parametri la velocità di propagazione, stimata in metri al minuto, che è un parametro essenziale per l'impostazione delle attività di lotta e anche per l'individuazione di aree del comprensorio particolarmente a rischio, quali ad esempio le periferie delle aree abitate, che grazie alla



stima della velocità di propagazione e dell'ora di arrivo delle fiamme, possono essere adeguatamente protette, ad esempio con interventi di protezione civile e di evacuazione. Un altro tematismo essenziale per l'impostazione degli interventi di lotta è la fireline intensity, che misura in kW/m l'energia rilasciata dal combustibile vegetale per metro di fronte di avanzamento dell'incendio; tale parametro è essenziale perché consente di impostare delle soglie minime necessarie per effettuare interventi di spegnimento in sicurezza e pertanto di individuare le zone del territorio maggiormente indicate per l'esecuzione degli interventi; analogamente per gli interventi aerei, i valori previsti di fireline intensity possono guidare la scelta del mezzo e fornire indicazioni sulla potenziale efficacia degli interventi stessi. Questi tematismi, unitamente a informazioni sulle condizioni meteorologiche ugualmente fornite dalla catena modellistica, ad esempio alle stime dell'umidità del combustibile e alla stima della direzione e intensità del vento, possono essere molto utili per guidare le scelte tattiche di intervento. Di seguito si riportano una serie di mappe relative ad alcuni casi di studio utilizzati per la fase di test e validazione del simulatore (vedi Figura 8, Figura 9, Figura 10 e Figura 11).



*Figura 8 - Perimetro simulato (rosso) e reale (giallo) del primo step dell'incendio del Montiferru (24/07/2021). Le linee rosse indicano gli avanzamenti dell'incendio simulato per ogni mezz'ora di propagazione. Il punto di insorgenza è indicato dal punto arancione.*

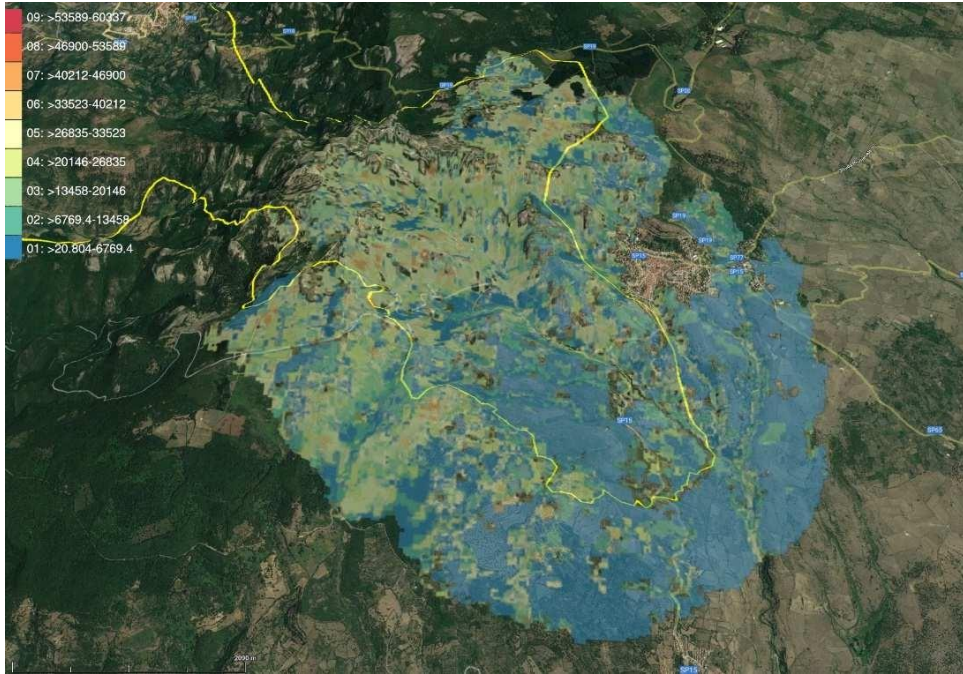


Figura 9 - Mappa della fireline intensity (kw/m) del primo step dell'incendio del montiferru (24/07/2021). Valori alti dell'intensità, superiori a 25000 kw/m, si verificano nelle aree forestali in quota (nord-ovest) caratterizzate da carichi di combustibile elevati e continuità verticale della vegetazione.

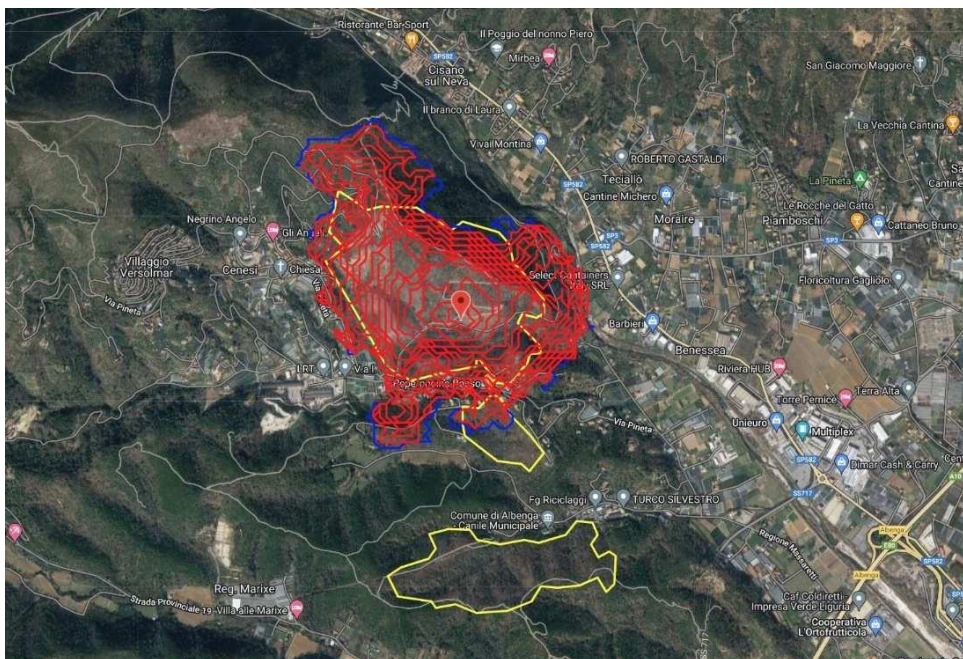
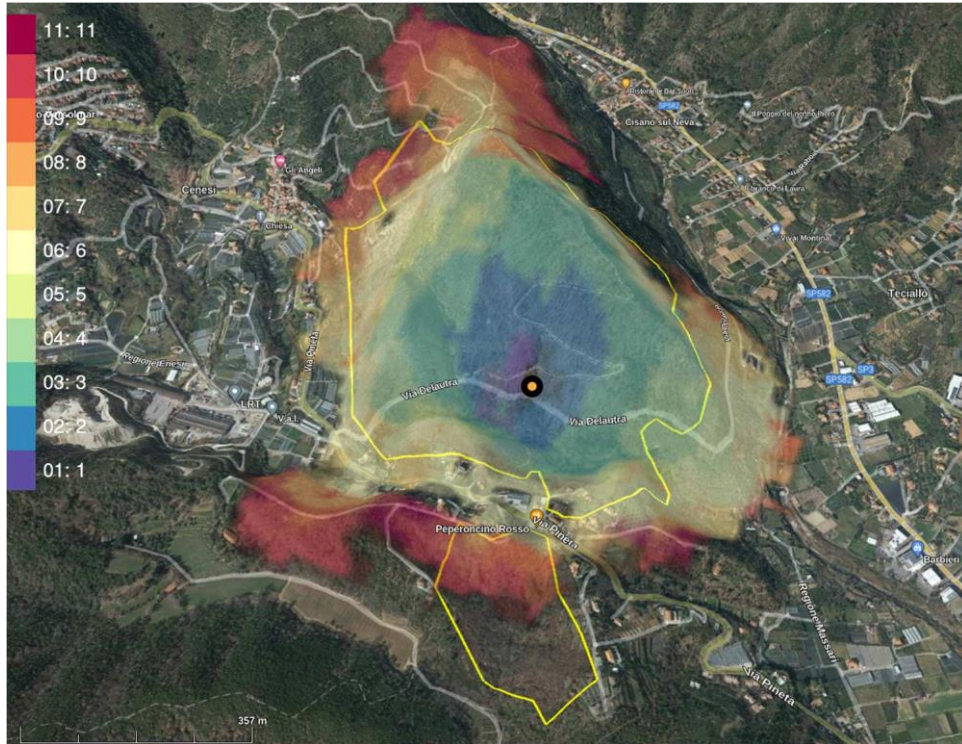


Figura 10 - Perimetro simulato (rosso) e reale (giallo) dell'incendio di Cisano sul Neva (06/09/2021). Le linee rosse indicano gli avanzamenti dell'incendio simulato per ogni mezz'ora di propagazione. Il punto di insorgenza è indicato dal puntatore rosso.





*Figura 11 - Mappa del tempo di arrivo delle fiamme nei diversi punti dell'incendio di Cisano sul Neva (06/09/2021), a partire dal punto di insorgenza (indicato dal punto arancione).*

## 4 Conclusioni

L'utilizzo dei simulatori di propagazione del fronte di fiamma permette di avere informazioni sul comportamento del fuoco e indirizzare l'attività di spegnimento.

Le esperienze condotte nella scorsa estate 2022 su incendi reali hanno dimostrato come il modello sebbene soggetto a incertezza è in grado di stimare con buona approssimazione l'ordine di grandezza dell'area bruciata in un tempo fissato. Questo permette di comprendere velocemente la possibile evoluzione del fuoco e supportare l'organizzazione della strategia di intervento dimensionato in modo opportuno. Il modello fornisce indicazioni delle zone dove l'intervento può essere più efficiente e delle aree dove la propagazione del fuoco è difficilmente controllabile, permettendo una migliore gestione delle risorse. È stato di recente dimostrato come il modello possa essere utilizzato a risoluzioni più elevate (5 m, 10 min) diventando potenzialmente uno strumento utile alla pianificazione di intervento di fuoco prescritto. Il monitoraggio del fuoco prescritto, opportunamente pianificato, potrebbe permettere una migliore calibrazione parametrica del modello al fine di renderlo sempre più affidabile. L'esecuzione di questi cantieri potrebbe essere un momento formativo unico e importante finalizzato alla comprensione del processo di propagazione del fuoco in differenti contesti. L'esperienza condotta nell'ambito del progetto ha messo in evidenza la necessità di definire un framework comune che permetta di accedere alle informazioni in input alle diverse modellistiche di propagazione del fuoco, concentrando l'attenzione sui possibili miglioramenti della modellistica.



**Programma Interreg Italia-Francia Marittimo 2014-2020**

## **“MEDCOOPFIRE**

### **Coopération méditerranéenne pour la défense des forêts contre les incendies”**

**Composante T2 “Déploiement territorial d'outils innovants pour  
optimiser les interventions d'urgence ”**

**Activité T2.1 “ Suivi et gestion des interventions avec des approches  
innovantes ”**

**Produit T.2.1.1 “Rapport technique sur l'outil de soutien”**

## Autours

Silvia Degli Esposti - Fondazione CIMA

Paolo Fiorucci - Fondazione CIMA

Andrea Trucchia - Fondazione CIMA

Bachisio Arca - CNR-IBE

## Liste des matières

1	Objectif.....	5
2	Descrizione di PROPAGATOR: simulatore di incendi boschivi ad automi cellulari.....	6
2.1	Le fonctionnement du PROPAGATOR.....	7
2.2	Exemples de cas d'utilisation .....	13
2.3	BIBLIOGRAPHIE.....	17
3	Le simulateur de propagation Web-based Wildfire Simulator (WWS).....	20
4	Conclusions .....	24

## Liste des figures

Figure 1 -.Diagramme d'état de l'automate adopté dans Propagator. Les états - 1, 1, 0 représentent respectivement les cellules non brûlées, les cellules brûlées et les cellules déjà brûlées. À un instant  $t$  donné, une cellule non brûlée a une probabilité  $p - 1 \rightarrow 1$  de brûler. Cette probabilité est donnée par l'état global de la réalisation stochastique, les conditions initiales et les conditions aux limites. Au prochain pas de temps du processus stochastique, chaque cellule brûlée sera définie comme une cellule brûlée (et donc inactive)..... 8

Figure 2 – Schéma du fonctionnement du Propagator : en haut à gauche : ordonnancement qui donne des décalages différents aux cellules lorsqu'elles sont traversées par le feu. En bas à droite : diverses réalisations stochastiques du processus convergent vers une seule carte de probabilité de l'arrivée du feu ..... 9

Figure 3 - Propagation d'une cellule de la  $i$ -ème cellule (point de déclenchement, dans ce cas) à plusieurs  $j$ -èmes cellules du temps  $t = 0$  au temps  $t = 1$ . Le diagramme de Moore d'un point de déclenchement unique est montré pour différentes réalisations du processus stochastique. Comme les règles de propagation du feu sont probabilistes, à chaque réalisation du processus, plusieurs cellules  $j$  sont enflammées par le feu propagé par la cellule  $i$ ..... 10

Figure 4 - Ci-dessus : simulation PROPAGATOR sur 12 heures de l'incendie de Cisano sul Neva, en utilisant les " actions lourdes " comme seule condition de lutte contre l'incendie pour tracer la Via Pineta, une barrière qui ne serait autrement pas apparue sur la carte de végétation. Ci-dessous : périmètre d'incendie..... 14

Figure 5 - Iso-chrone de la simulation du PROPAGATOR de Montiferru. A chaque pas de temps, PROPAGATOR représente un champ scalaire entre 0 et 1, relatif à la probabilité d'arrivée du feu à un pixel donné. Chaque ligne de cette figure représente l'isolinea 0.5 pour une heure donnée d'avancement du front (jaune à orange). Le bleu représente la zone brûlée acquise par satellite ..... 15

Figure 6 - Rate of Spread (vitesse de propagation) moyen. Dans chaque cellule, le feu se propage avec une certaine vitesse, pour chacune des N réalisations. La moyenne représente une carte qui nous informe de la manière dont le front a accéléré ou décéléré au cours de sa progression ..... 16

Figure 7 - Fireline Intensity (intensité linéaire de la flamme) moyenne. Dans chaque cellule, le feu se propage avec une certaine intensité, pour chacune des N réalisations. La moyenne représente une carte qui nous informe de l'intensité de l'avancée du front. .... 17

Figure 8 - Périmètre simulé (rouge) et réel (jaune) de la première étape de l'incendie de Montiferru (24/07/2021). Les lignes rouges indiquent la progression de l'incendie simulé pour chaque demi-heure de propagation. Le point de départ est indiqué par le point orange..... 21

Figure 9 - Carte de la fireline intensity (kw/m) de la première étape de l'incendie de Montiferru (24/07/2021). Les valeurs d'intensité élevées, supérieures à 25 000 kw/m, sont observées dans les zones forestières de haute altitude (nord-ouest) caractérisées par des charges combustibles élevées et une continuité verticale de la végétation 22

Figure 10 -. Périmètre simulé (rouge) et réel (jaune) de l'incendie de Cisano sul Neva (06/09/2021). Les lignes rouges indiquent la progression de l'incendie simulé pour chaque demi-heure de propagation. Le point de départ est indiqué par le pointeur rouge. .... 22

Figure 11 - Carte du temps d'arrivée des flammes en différents points de l'incendie de Cisano sul Neva (06/09/2021), en partant du point de départ (indiqué par le point orange) ..... 23

# 1 Objectif

Ce document, produit T.2.1.1 "Rapport technique sur l'outil de soutien" décrit les outils qui ont été mis en œuvre et/ou mis à jour dans le cadre du projet Medcoopfire et du projet Medstar pour la simulation du comportement du front de flamme.

En particulier, le fonctionnement du simulateur PROPAGATOR mis en œuvre par la Fondation de recherche CIMA dans le cadre du projet MEDCOOPFIRE est présenté en détail et un résumé est donné du simulateur Web-based Wildfire Simulator (WWS) réalisé par CNR-IBE dans le cadre du projet MED-Star et utilisé dans le cadre du projet MEDCOOPFIRE en capitalisant les résultats obtenus. Pour une description détaillée du simulateur WWS, veuillez-vous référer au rapport T2.2.2 du projet MED-Star.

## 2 Descrizione di PROPAGATOR: simulatore di incendi boschivi ad automi cellulari.

PROPAGATOR [1,15] est un modèle d'automate cellulaire stochastique pour la simulation de la propagation des feux de forêt, conçu comme une méthode rapide d'évaluation des risques d'incendie. Le modèle utilise des informations à haute résolution telles que la topographie et la couverture végétale, en tenant compte des différents types de végétation. Chaque type de végétation est en effet caractérisé par des valeurs différentes de susceptibilité au feu et de vitesse du front de flamme. Les paramètres d'entrée du modèle sont la vitesse et la direction du vent et le point d'allumage. La teneur en humidité du combustible mort fin peut également être prise en compte et l'option permettant de simuler le phénomène de feu disséminant ("fire spotting") peut être sélectionnée. Les conditions limites peuvent être sélectionnées par l'utilisateur ou récupérées à partir d'un modèle météorologique (pour ce qui est du vent) et de RISICO (pour ce qui est de l'humidité de la nécromasse).

Chaque simulation peut inclure l'effet de différentes stratégies de lutte contre le feu, telles que des actions de lutte au sol avec des lignes d'eau ou la coupe de la végétation, et des actions de lutte aérienne avec des Canadairs et des hélicoptères. La souplesse du modèle facilite la représentation du scénario d'incendie de forêt souhaité. La probabilité de propagation du feu dépend du type de végétation, de la pente, de la direction et de la vitesse du vent et de la teneur en humidité du combustible. La vitesse de propagation du feu est déterminée à l'aide d'un modèle de "vitesse de propagation" de la littérature. PROPAGATOR simule des réalisations indépendantes d'un processus stochastique de propagation du feu et, à chaque étape temporelle, produit une carte représentant la probabilité que chaque cellule du domaine soit affectée par le feu. Ces probabilités sont obtenues en calculant la fréquence relative d'allumage de chaque cellule parmi toutes les simulations effectuées.

Une simulation sur 24-48 heures peut être réalisée en l'ordre de quelques minutes en utilisant la plateforme MEDSTAR. Chaque simulation permet de visualiser les isochrones horaires du front de flamme, la carte de probabilité d'arrivée du feu pour chaque heure de simulation, les cartes de vitesse ("Rate of Spread") et d'intensité linéaire ("Fireline Intensity") du front de flamme, maximale et moyenne, pour chaque pixel du domaine.

## 2.1 Le fonctionnement du PROPAGATOR

Les processus physiques qui influencent la propagation des incendies sont complexes : les effets de la pente (orographie), des conditions de vent et de l'humidité du combustible se combinent, déterminant l'évolution du feu dans l'espace et dans le temps. Ces facteurs font des feux des phénomènes multi-échelles, multi-physiques et non-linéaires. La formulation de modèles mathématiques efficaces et fiables est donc un défi, tout comme la mise en œuvre informatique des modèles adoptés.

Il existe de nombreuses approches et modèles différents dédiés à cette tâche dans la littérature. Ces approches de modélisation sont généralement divisées en trois branches principales [1][12][13][14] :

- 1) des modèles empiriques et semi-empiriques, basés sur des lois de propagation du feu dérivées statistiquement ;
- 2) les modèles macroscopiques-déterministes, dans lesquels la propagation du feu est modélisée dans un continuum, principalement à l'aide de techniques de dynamique des fluides computationnelle couplées à des modèles atmosphériques, de transfert de chaleur et de combustion ;
- (3) les modèles stochastiques en treillis ou en grille, dans lesquels les quantités d'intérêt sont décrites en adoptant une discrétisation dans l'espace et le temps, et en traitant la propagation du front de feu d'une cellule aux cellules voisines en adoptant des règles d'évolution localisées détaillées qui incluent la physique sous-jacente au niveau de résolution souhaité.

Comme décrit par Trucchia et al. [1], le modèle Propagator est un modèle d'automate cellulaire stochastique pour la simulation de la propagation des feux de forêt. Il est basé sur une implémentation matricielle, qui discrétise l'espace en une grille composée de cellules carrées de 20 mètres de côté avec des informations sur l'altitude et la couverture végétale.

Le modèle prend les informations statiques du DEM et des rasters de couverture végétale, tandis que les conditions aux limites (dynamique du vent moyen sur le domaine et FPMC, humidité de la nécromasse fine) sont traitées au format JSON. Ces conditions aux limites seront utilisées comme entrée pour les règles probabilistes pour l'avancement du front de flamme. Les conditions météorologiques et de vent peuvent être fournies par l'utilisateur ou obtenues respectivement à partir du modèle RISICO et du modèle de prévision numérique du temps (NWP). Ces conditions aux limites doivent

être considérées comme homogènes sur l'ensemble du domaine de calcul pour chaque pas de temps.

Pour chaque pas de temps, chaque cellule est caractérisée par un état, qui peut être brûlant (état 1), déjà brûlé (état 0) ou imbrûlé (état -1) : une cellule dans un état imbrûlé peut devenir une cellule brûlante, selon la probabilité d'être enflammée, ou peut rester dans le même état ; une cellule dans un état brûlant devient une cellule brûlée après un pas de temps ; une cellule dans un état déjà brûlé reste dans le même état jusqu'à la fin de la simulation. La Figure 1 représente un schéma simple des changements possibles dans les états des cellules. Lorsque le feu se propage d'une cellule à une autre, cette dernière bénéficie d'un temps spécifique pour que le front de feu la traverse complètement, décrit plus précisément dans les parties suivantes. Au fur et à mesure que ce temps s'écoule, la cellule passe de l'état non brûlé (-1) à l'état brûlé (1), et tente alors de propager le feu aux cellules non brûlées adjacentes. En termes opérationnels, le pas de temps  $\Delta t$  calculé pour le changement d'état est ajouté en conséquence à un *scheduler* qui gère le mécanisme de propagation des feux de l'automate cellulaire.

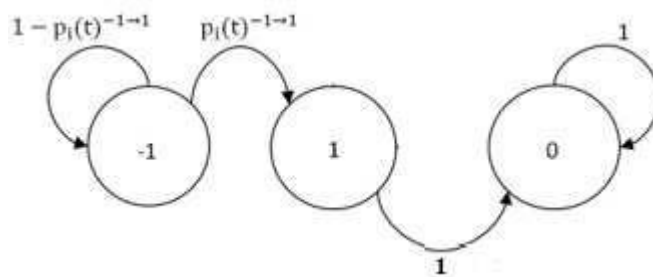


Figure 1 - Diagramme d'état de l'automate adopté dans Propagator. Les états -1, 1, 0 représentent respectivement les cellules non brûlées, les cellules brûlées et les cellules déjà brûlées. À un instant  $t$  donné, une cellule non brûlée a une probabilité  $p - 1 \rightarrow 1$  de brûler. Cette probabilité est donnée par l'état global de la réalisation stochastique, les conditions initiales et les conditions aux limites. Au prochain pas de temps du processus stochastique, chaque cellule brûlée sera définie comme une cellule brûlée (et donc inactive).



## Probabilistic rules

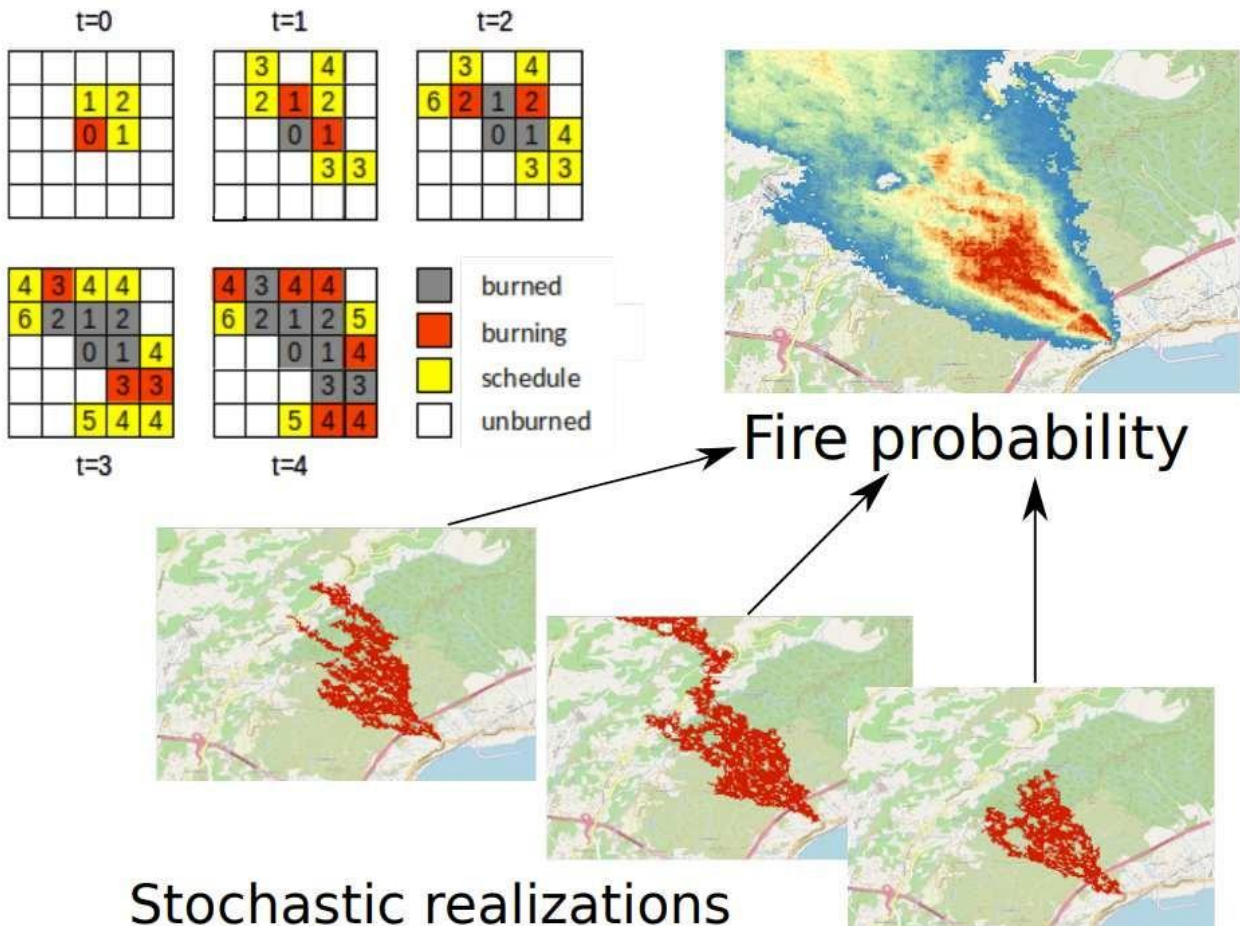


Figure 2 – Schéma du fonctionnement du Propagator : en haut à gauche : ordonnancement qui donne des décalages différents aux cellules lorsqu'elles sont traversées par le feu. En bas à droite : diverses réalisations stochastiques du processus convergent vers une seule carte de probabilité de l'arrivée du feu.

La propagation du feu est modélisée comme un processus de contamination entre cellules adjacentes du domaine considéré ; la probabilité de propagation du feu d'une cellule à l'un de ses voisins,  $p_{ij}$ , est calculée à partir de la probabilité nominale de propagation du feu (appelée  $p_n$  dans la suite), qui est ensuite modifiée en tenant compte de plusieurs facteurs. Ces facteurs tiennent compte de la topographie, du vecteur vent et de la teneur en humidité du combustible. En outre, l'évolution temporelle de l'incendie est modélisée en combinant la vitesse de propagation nominale de l'incendie ( $v_n$  dans la suite) et les mêmes facteurs d'influence, par la mise en œuvre d'un modèle de vitesse de propagation (Rate of Spread) (RoS). Pour chaque cellule de simulation, correspondant à un point du domaine spatial, le modèle calcule la probabilité  $u(x_p, t)$

d'être brûlé au moment  $t$  et dans l'espace  $x$  en estimant le taux de feu pour chaque cellule, sur la base de 100 simulations stochastiques et chaque simulation est exécutée pour le même point d'allumage et les mêmes conditions de vent (Figure 2).

L'automate cellulaire est appliqué au voisinage de Moore (voir Figure 3), un réseau carré bidimensionnel composé d'une cellule centrale, la  $i$ -ème cellule, à partir de laquelle le feu se propage, et des huit cellules environnantes, qui peuvent être enflammées par contact avec la  $i$ -ème cellule. La propagation du feu est calculée de manière stochastique en considérant le vecteur du centre de la  $i$ -ème cellule à celui des cellules voisines, la pente entre les cellules au début de la propagation ( $i$ ) et celles à la fin, et, l'humidité de la nécromasse.

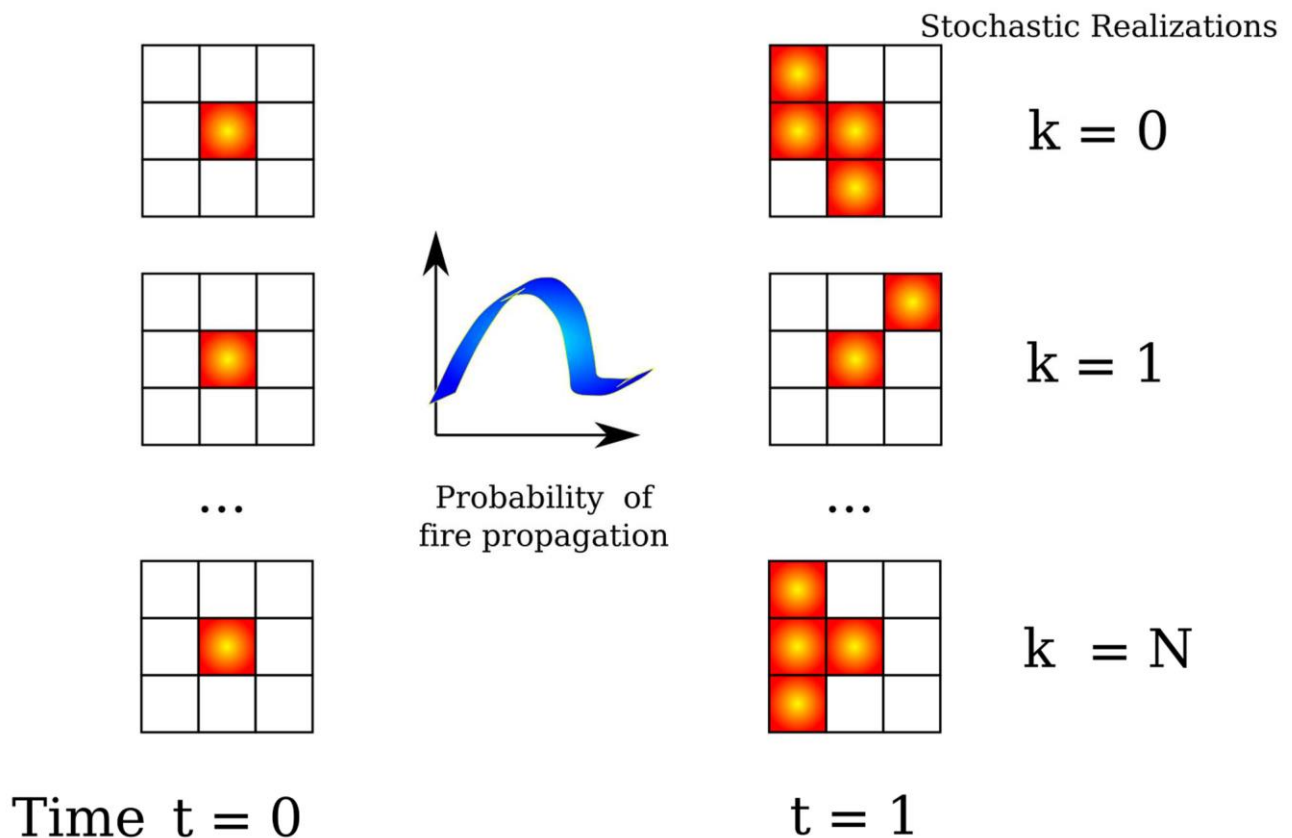


Figure 3 - Propagation d'une cellule de la  $i$ -ème cellule (point de déclenchement, dans ce cas) à plusieurs  $j$ -èmes cellules du temps  $t = 0$  au temps  $t = 1$ . Le diagramme de Moore d'un point de déclenchement unique est montré pour différentes réalisations du processus stochastique. Comme les règles de propagation du feu sont probabilistes, à chaque réalisation du processus, plusieurs cellules  $j$  sont enflammées par le feu propagé par la cellule  $i$ .

Chaque cellule est caractérisée par un type de végétation : PROPAGATOR adopte un modèle de combustible simplifié et personnalisable avec sept types de combustibles disponibles correspondant à sept types de végétation différents. Les types de combustibles considérés sont les feuillus, les arbustes, les prairies, les conifères sujets au feu, l'agroforesterie, les forêts sujettes au feu et les zones non végétalisées.

Le feu se propage d'une cellule  $i$  à la cellule  $j$  voisine avec une probabilité  $p_{ij}$ , appelée Fire Spread Probability, qui dépend fortement des types de végétation impliqués.  $p_{ij}$  est également influencée par la pente entre les deux cellules, l'effet du vent (direction et vitesse) et la teneur en humidité du combustible dans la cellule  $j$ . Le modèle tient compte de la végétation de la cellule qui brûle et des cellules dans lesquelles le feu peut se propager ( $j$ ) et modélise la façon dont un certain type de végétation peut enflammer d'autres types de végétation, voire le même type de végétation (dans le cas de deux cellules contiguës ayant le même couvert végétal). Ces valeurs de probabilité sont introduites dans un tableau de probabilité de propagation du feu, qui prend en compte toutes les combinaisons possibles "du début à la fin" entre les différents types de végétation et de couverture du sol. La Fire Spread Probability,  $p_n$ , représente la possibilité pour la  $i$ -ème cellule caractérisée par un certain couvert végétal d'enflammer une "j-ème" cellule adjacente caractérisée par le même couvert végétal ou un couvert végétal différent, sans tenir compte d'autres facteurs extérieurs à la végétation. Les valeurs  $p_n$  ont été définies de manière empirique, selon un étalonnage continu et approfondi tout au long du développement du modèle, en utilisant également les résultats de la cartographie statique de la susceptibilité au feu [2]. La vitesse et la direction du vent agissent comme un facteur qui modifie la valeur initiale de  $p_n$ , augmentant ou diminuant la valeur nominale selon la direction de la propagation. L'influence de la topographie est prise en compte à travers la pente entre les deux cellules. La pente augmente la probabilité de propagation  $p_n$  lorsque la propagation se fait en amont, et diminue  $p_n$  si la pente diminue dans le sens de la propagation (cas de la descente). L'influence du vent est prise en compte en considérant la vitesse du vent et sa direction (toutes deux considérées comme homogènes dans le domaine) par rapport à la direction de la cellule en feu et des cellules adjacentes. À chaque pas de temps, la valeur du vent pour chaque cellule est perturbée à la fois dans sa magnitude et sa direction pour modéliser la stochasticité et la turbulence. La magnitude du vent est modifiée en multipliant chaque cellule par un facteur de bruit uniforme, distribué comme  $U[0,8,1,2]$ , où  $U[a,b]$  représente la distribution uniforme avec support dans  $[a,b]$ . La direction du vent est perturbée par l'ajout d'un bruit uniforme  $U[-11.25^\circ, 11.25^\circ]$ . L'influence n'est significative que si la vitesse du vent est assez élevée : dans le cas d'une vitesse faible, le facteur vent ne modifie pas la probabilité de propagation. Cependant, lorsque la vitesse du vent est suffisamment élevée, elle a généralement un impact important sur la propagation. La direction du vent joue un rôle

clé dans le processus global, car la probabilité de brûler augmente lorsque la direction de la propagation est alignée avec la direction du vent, tandis qu'elle diminue lorsque les directions sont opposées. L'effet de la teneur en humidité du combustible sur la probabilité de propagation du feu a été modélisé comme un facteur  $e_m$ , qui multiplie la probabilité nominale  $p_n$ . Ce facteur a été mis en œuvre comme décrit par Burgan et Rothermel dans [3]. Il varie dans l'intervalle [0,1] et est calculé en fonction du "taux d'humidité du combustible", c'est-à-dire de la teneur en humidité du combustible mort par rapport à l'humidité d'extinction du combustible mort. Pour des raisons de simplicité, la valeur de 0,3 a été utilisée pour l'humidité d'extinction pour toutes les classes de végétation en appliquant une estimation conservatrice [4].

La propagation du feu entre deux cellules peut être résumée par la formulation suivante:

$$p_{ij} = (1 - (1 - p_n)^{\alpha_{wh}}) e_m$$

Où  $p_{ij}$ ,  $p_n$  et  $e_m$  sont les valeurs qui viennent d'être décrites de la probabilité de propagation, de la probabilité nominale et de l'effet de l'humidité de la nécromasse, et  $\alpha_{wh}$  est le paramètre représentant les contributions du vent et de la pente dans la propagation de la cellule  $i$  à  $j$  [1].

Lorsqu'une cellule "d'arrivée"  $j$  est allumée à partir de la cellule "de départ"  $i$ , le temps nécessaire à la propagation du feu est d'une importance capitale pour une représentation correcte de la dynamique temporelle du feu. Ce temps de transition est modélisé en divisant la distance  $d$  entre les cellules de départ et d'arrivée ( $i, j$ ) par le taux de propagation "Rate of Spread (RoS)"  $v_{prop}$  et le facteur d'humidité du combustible  $f_m$ , qui est calculé à l'aide de la formulation proposée par Marino et al. [5]. Le Rate of Spread  $v_{prop}$  est calculé à partir de la  $v_n$  nominale, c'est-à-dire une vitesse de base qui ne dépend que du type de végétation, puis modifié en tenant compte de l'orographie (pente) et du vent. Les effets du vent et de la pente ( $K_w$  et  $K_\phi$  respectivement) ont été évalués à l'aide des formulations proposées par Sun et al [6]. La vitesse de propagation (RoS) est ensuite évaluée en multipliant la vitesse nominale de propagation du feu  $v_n$  par les deux facteurs,  $K_w$  et  $K_\phi$ . L'intensité de la flamme linéaire, "Fireline intensity", est ensuite obtenue en multipliant la vitesse de propagation par le "Lower Heating Value" (LHV) et il "Fuel Load" de la cellule étudiée.

A chaque heure de simulation, le modèle évalue le taux d'incendie de chaque cellule du domaine, en combinant les résultats des 100 simulations ; il obtient alors pour chaque pixel, pour chaque heure d'incendie simulée, une quantité comprise entre 0 et 1 qui correspond à la probabilité pour l'incendie d'atteindre la cellule en question à un moment donné. Nous évaluons également les valeurs moyennes et maximales de la Rate of

Spread (RoS) et de l'intensité linéaire de la flamme qui ont été simulées pour chaque cellule du domaine en faisant la moyenne des réalisations du processus stochastique.

Diverses actions de lutte contre l'incendie sont également mises en œuvre dans le modèle afin de représenter un large éventail d'études de cas et de scénarios.

- Il est possible de spécifier des lignes d'eau, qui sont mises en œuvre dans le modèle de calcul en fixant la teneur en humidité fine du combustible à une valeur prescrite  $\mu_{wf} = 0.8$  dans les cellules de domaine concernées, de sorte que la probabilité de propagation du feu est fortement réduite ;
- Les équipements lourds peuvent également être mis en œuvre en modifiant les valeurs du type de végétation en "zones non végétalisées" dans les zones où ils doivent être simulés. De cette façon, le feu ne peut pas se propager dans ces zones.
- Les actions peuvent également être mises en œuvre à l'aide de moyens aériens (canadair ou hélicoptère), obtenant des résultats similaires aux lignes d'eau mais avec une conformation différente de la zone concernée afin de simuler la conformation d'un rejet d'eau.

Le phénomène des taches de feu a également été mis en œuvre au sein du PROPAGATOR. Actuellement, la formulation empirique d'Alexandridis [16] est mise en œuvre, tandis que des études récentes [18] ont montré la faisabilité de l'adoption d'un modèle de repérage plus physique, tel que celui de Trucchia et al. [17] dans PROPAGATOR.

## 2.2 Exemples de cas d'utilisation

CISANO SUL NEVA - 6 septembre 2021

Le feu s'est développé très près de l'interface forêt urbaine, où une centaine de pompiers et de volontaires et cinq véhicules aériens sont intervenus. 12 heures de propagation du feu ont été simulées (voir Figure 4) en utilisant les données de la station météorologique voisine pour obtenir des données sur le vent.



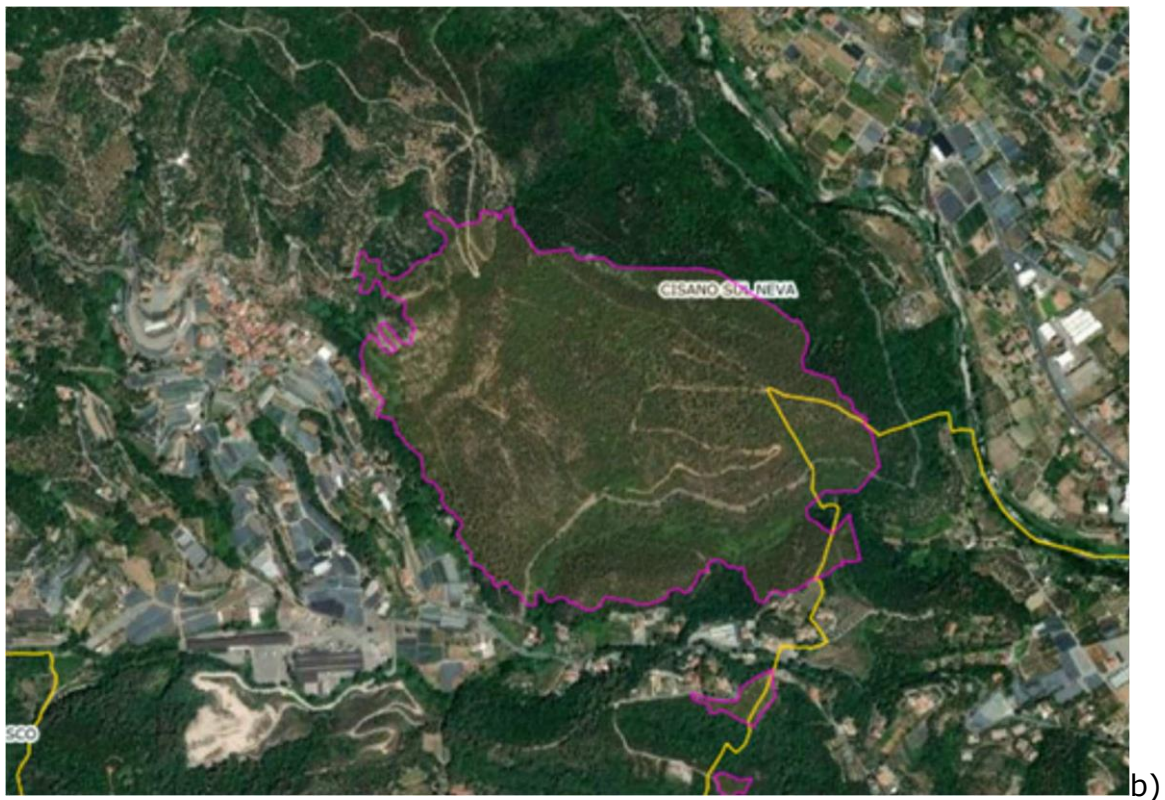
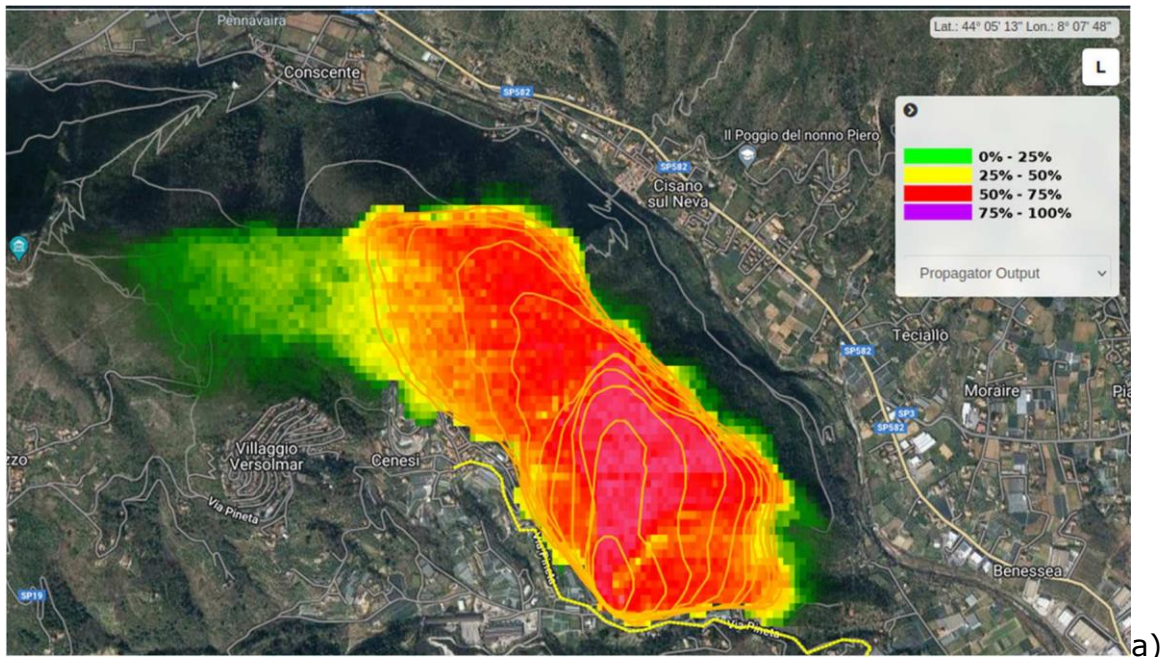


Figure 4 - Ci-dessus : simulation PROPAGATOR sur 12 heures de l'incendie de Cisano sul Neva, en utilisant les " actions lourdes " comme seule condition de lutte contre l'incendie pour tracer la Via Pineta, une barrière qui ne serait autrement pas apparue sur la carte de végétation. Ci-dessous : périmètre d'incendie.



## MONTIFERRU – 24 juillet 2021

L'incendie de Montiferru, qui après avoir encerclé Santu Lussurgiu s'est déplacé vers le nord-ouest, menaçant Cuglieri et provoquant l'évacuation de centaines de personnes, a touché une superficie de plus de 11 000 hectares.

Les figures suivantes (Figure 5, Figure 6, et Figure 7) représentent une simulation du PROPAGATOR (36 heures) ainsi que la zone touchée par l'incendie.

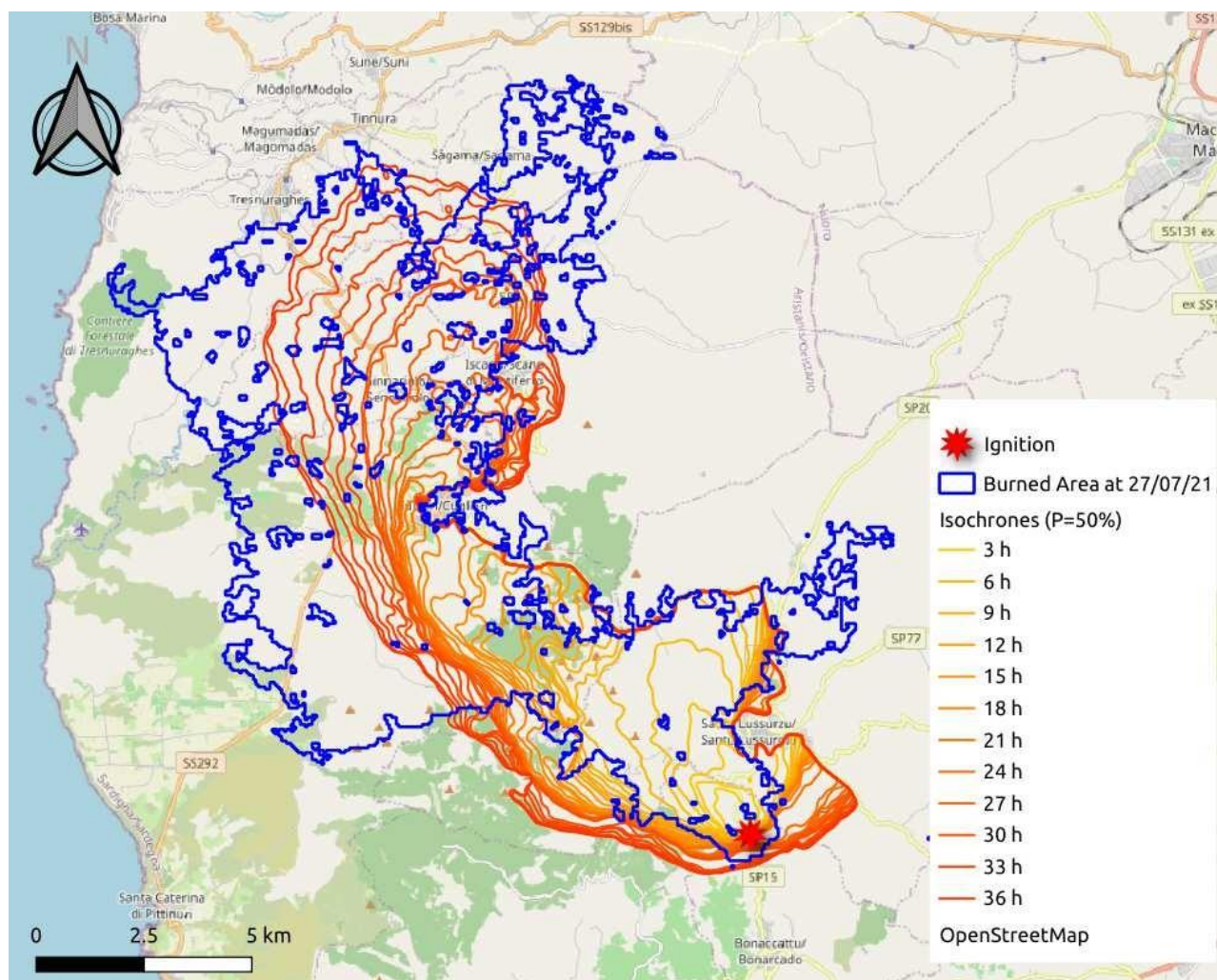


Figure 5 - Iso-chrones de la simulation du PROPAGATOR de Montiferru. A chaque pas de temps, PROPAGATOR représente un champ scalaire entre 0 et 1, relatif à la probabilité d'arrivée du feu à un pixel donné. Chaque ligne de cette figure représente l'isolinea 0.5 pour une heure donnée d'avancement du front (jaune à orange). Le bleu représente la zone brûlée acquise par satellite.

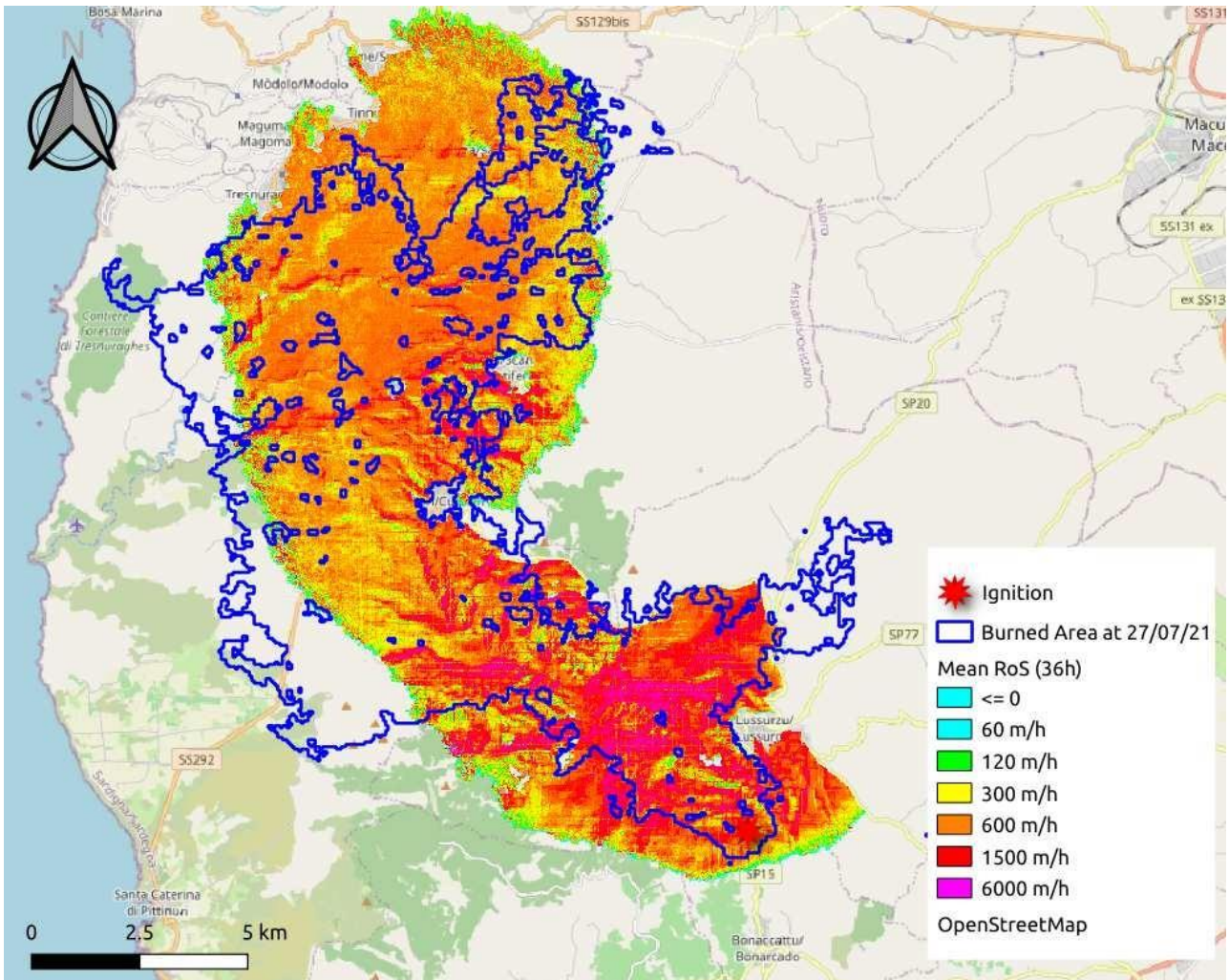


Figure 6 - Rate of Spread (vitesse de propagation) moyen. Dans chaque cellule, le feu se propage avec une certaine vitesse, pour chacune des  $N$  réalisations. La moyenne représente une carte qui nous informe de la manière dont le front a accéléré ou décéléré au cours de sa progression.



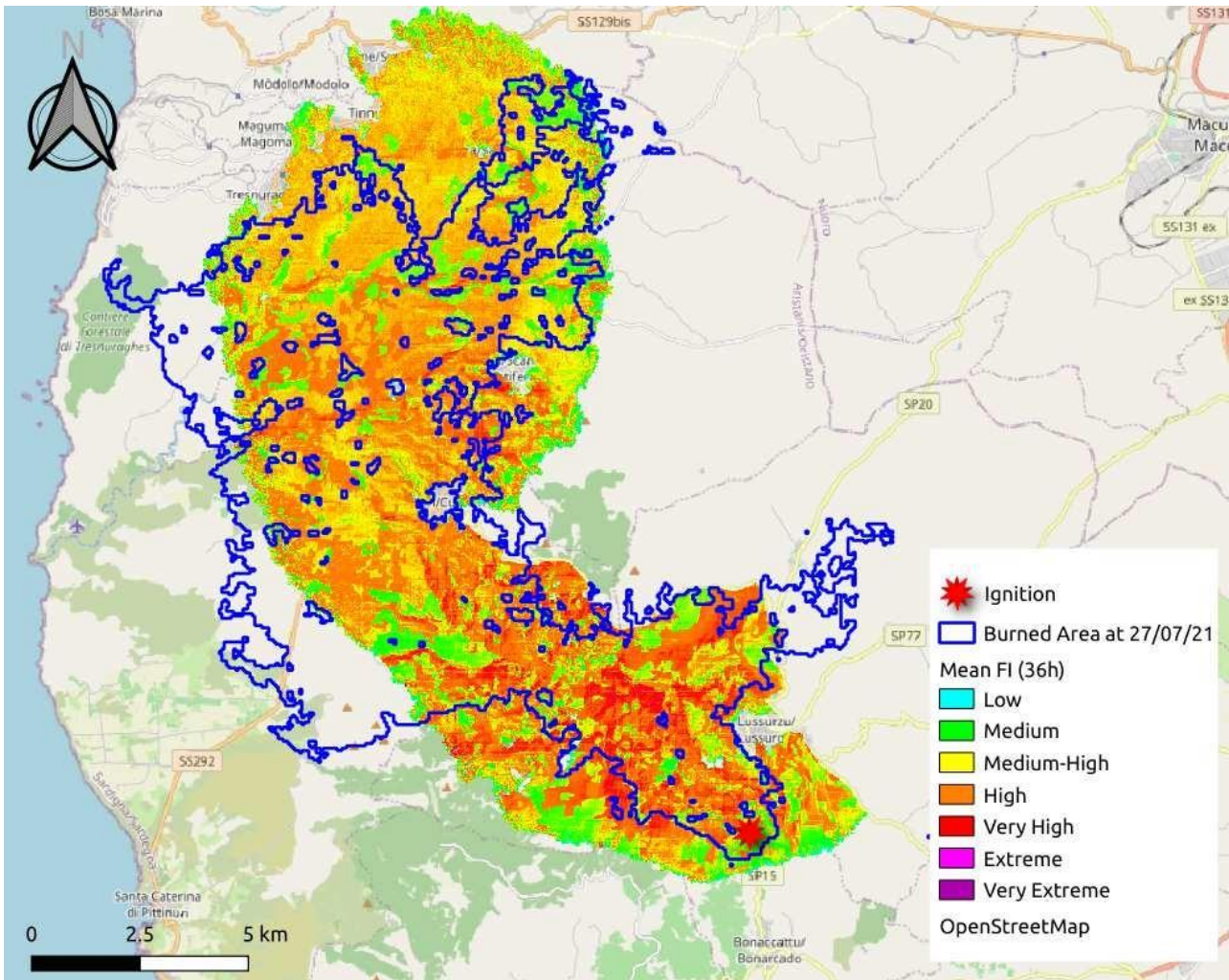


Figure 7 - Fireline Intensity (intensité linéaire de la flamme) moyenne. Dans chaque cellule, le feu se propage avec une certaine intensité, pour chacune des N réalisations. La moyenne représente une carte qui nous informe de l'intensité de l'avancée du front.

## 2.3 BIBLIOGRAPHIE

[1] Trucchia, A.; D'Andrea, M.; Baghino, F.; Fiorucci, P.; Ferraris, L.; Negro, D.; Gollini, A.; Severino, M. PROPAGATOR: An Operational Cellular-Automata Based Wildfire Simulator. *Fire* 2020, 3, 26. <https://doi.org/10.3390/fire3030026>

[2] Tonini, M.; D'Andrea, M.; Biondi, G.; Degli Esposti, S.; Trucchia, A.; Fiorucci, P. A Machine Learning-Based Approach for Wildfire Susceptibility Mapping. The Case Study of the Liguria Region in Italy. *Geosciences* 2020, 10, 105.

- [3] Burgan, R.E.; Rothermel, R.C. BEHAVE: Fire Behavior Prediction and Fuel Modeling System, Fuel Subsystem; U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station: Fort Collins, CO, USA, 1984.
- [4] Anderson, H.E. Aids to Determining Fuel Models for Estimating Fire Behavior; General Technical Report INT-122; U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station: Ogden, UT, USA, 1982.
- [5] Marino, E.; Dupuy, J.L.; Pimont, F.; Guijarro, M.; Hernando, C.; Linn, R. Fuel bulk density and fuel moisture content effects on fire rate of spread: A comparison between FIRETEC model predictions and experimental results in shrub fuels. *J. Fire Sci.* 2012, 30, 277–299.
- [6] Sun, T.; Zhang, L.; Chen, W.; Tang, X.; Qin, Q. Mountains Forest Fire Spread Simulator Based on Geo-Cellular Automaton Combined With Wang Zhengfei Velocity Model. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 2013, 6, 1971–1987.
- [7] Sorensen, T. A Method of Establishing Groups of Equal Amplitudes in Plant Sociology Based on Similarity of Species Content and Its Application to Analyses of the Vegetation on Danish Commons. *K. Dan. Vidensk. Selsk. Biol. Skr.* 1948, 5, 1–34.
- [8] Arca, B.; Ghisu, T.; Casula, M.; Salis, M.; Duce, P. A web-based wildfire simulator for operational applications. *Int. J. Wildland Fire* 2019, 28, 99–112.
- [9] Agresti, A. *An Introduction to Categorical Data Analysis*; Wiley Series in Probability and Statistics; Wiley Publishing: Hoboken, NJ, USA, 2007.
- [10] Mallinis, G.; Galidaki, G.; Gitas, I. A Comparative Analysis of EO-1 Hyperion, Quickbird and Landsat TM Imagery for Fuel Type Mapping of a Typical Mediterranean Landscape. *Remote Sens.* 2014, 6, 1684–1704.
- [11] Montealegre, A.L.; Lamelas, M.T.; Tanase, M.A.; De la Riva, J. Forest Fire Severity Assessment Using ALS Data in a Mediterranean Environment. *Remote Sens.* 2014, 6, 4240–4265
- [12] Sullivan, A.L. Wildland surface fire spread modeling, 1990–2007. 1: Physical and quasi-physical models. *Int. J. Wildland Fire* 2009, 18, 349–368.
- [13] Sullivan, A. Wildland surface fire spread modeling, 1990–2007. 2: Empirical and quasi-empirical models. *Int. J. Wildland Fire* 2009, 18, 369–386.
- [14] Sullivan, A. Wildland surface fire spread modeling, 1990–2007. 3: Simulation and mathematical analogue models. *Int. J. Wildland Fire* 2009, 18, 387–403.

- [15] Baghino, F.; Trucchia, A.; D'Andrea, M.; Fiorucci, P. PROPAGATOR, a Cellular Automata Model for Fast Wildfire Simulations: Latest Improvements and Future Perspectives. *Environ. Sci. Proc.* 2022, 17, 60. <https://doi.org/10.3390/environsciproc2022017060>
- [16] A. Alexandridis, D. Vakalis, C.I. Siettos, G.V. Bafas, A cellular automata model for forest fire spread prediction: The case of the wildfire that swept through Spetses Island in 1990, *Applied Mathematics and Computation*, Volume 204, Issue 1, 2008, Pages 191-201, ISSN 0096-3003, <https://doi.org/10.1016/j.amc.2008.06.046>.
- [17] Trucchia, A., Egorova, V., Butenko, A., Kaur, I., and Pagnini, G.: RandomFront 2.3: a physical parameterisation of fire spotting for operational fire spread models – implementation in WRF-SFIRE and response analysis with LSFIRE+, *Geosci. Model Dev.*, 12, 69–87, <https://doi.org/10.5194/gmd-12-69-2019>, 2019.
- [18] López-De-Castro, M.; Trucchia, A.; Fiorucci, P.; Pagnini, G. Physical and Non-Physical Fire-Spotting Models: A Comparison Study by a Wildfire Simulator Based on a Cellular Automata Approach. *Environ. Sci. Proc.* 2022, 17, 27. <https://doi.org/10.3390/environsciproc2022017027>

### 3 Le simulateur de propagation Web-based Wildfire Simulator (WWS).

L'application de simulateurs de propagation pendant les incendies en cours pourrait faciliter l'évaluation du comportement et de la gravité du feu, en évaluant son potentiel de propagation pour un horizon temporel défini et en permettant ainsi de mettre en évidence les zones, par exemple à l'interface, qui nécessitent des interventions spécifiques de lutte contre l'incendie ou de sécurité. C'est dans cette optique que le CNR-IBE a développé un simulateur de propagation pour des applications en temps réel, qui représente également la capitalisation d'expériences précédentes développées dans le cadre du PO maritime, à savoir les projets Proterina-Due et Proterina-C (Programme Interreg Italie-France Maritime 2007-2013). Dans ces projets précédents, le IBE a effectué un travail intensif de collecte de données et de production de cartes de végétation et de combustible, de calibrage et de validation de modèles de combustible et de modèles de propagation, et a également développé la première version d'un modèle de réduction d'échelle des champs de vent. Dans le cadre des projets MedSTAR et Medcoopfire, le développement de la chaîne de modélisation nécessaire à la prédiction en temps réel de la propagation des feux de forêt a été poursuivi, à travers les phases suivantes développement et parallélisation du code ; achèvement du développement de l'algorithme multigrille pour la prévision des champs de vent ; développement de fonctions pour la prévision probabiliste de la propagation ; développement d'une version du simulateur capable de fonctionner dans les autres régions du programme PO Marittimo ; développement de l'interface graphique et des fonctionnalités pour l'accès en ligne au simulateur ; développement d'un code pour la prédiction des feux de couronne ; tests de fonctionnement et validation des algorithmes et de la chaîne de modélisation, réalisés sur un ensemble de données météorologiques et de données sur les feux de forêt qui se sont réellement produits au cours des saisons 2019, 2020 et 2021. La validation du simulateur a été effectuée sur une série d'études de cas représentées par des incendies qui se sont réellement produits, en Sardaigne et dans d'autres zones du programme, au cours des dernières saisons des feux. Le simulateur a démontré sa capacité à fournir des prédictions de propagation et de comportement du feu en accord substantiel avec les périmètres réels et un coût de calcul adapté aux applications en temps réel. Le système produit les thèmes utiles suivants pour caractériser le comportement du feu : périmètre simulé, vitesse de propagation, intensité du front de flamme, longueur de la flamme, heure d'arrivée, carte du combustible, carte du feu de couronne, carte du champ de vent, carte de l'humidité du combustible. Parmi ces paramètres figure la vitesse de propagation, estimée en mètres par minute, qui est un paramètre essentiel pour la mise en place des activités



de lutte contre les incendies, mais aussi pour l'identification des zones du quartier particulièrement à risque, comme les abords des zones habitées, qui, grâce à l'estimation de la vitesse de propagation et du moment d'arrivée des flammes, peuvent être protégées de manière adéquate, par exemple avec des interventions de protection civile et d'évacuation. Un autre thème essentiel pour la planification des interventions de lutte contre les incendies est la fireline intensity, qui mesure en kW/m l'énergie libérée par le combustible végétal par mètre de front de feu ; ce paramètre est essentiel car il permet de fixer les seuils minimums nécessaires pour effectuer des interventions de lutte contre les incendies en toute sécurité et donc d'identifier les zones du territoire les plus appropriées pour effectuer des interventions ; de même, pour les interventions aériennes, les valeurs prévues de l'intensité de la ligne de feu peuvent guider le choix des moyens et fournir des indications sur l'efficacité potentielle des interventions elles-mêmes. Ces thèmes, ainsi que les informations sur les conditions météorologiques également fournies par la chaîne de modélisation, par exemple les estimations de l'humidité du combustible et les estimations de la direction et de l'intensité du vent, peuvent être très utiles pour orienter les choix d'intervention tactique. Vous trouverez ci-dessous une série de cartes de certaines des études de cas utilisées dans la phase de test et de validation du simulateur (voir Figure 8, Figure 9, Figure 10, et Figure 11).

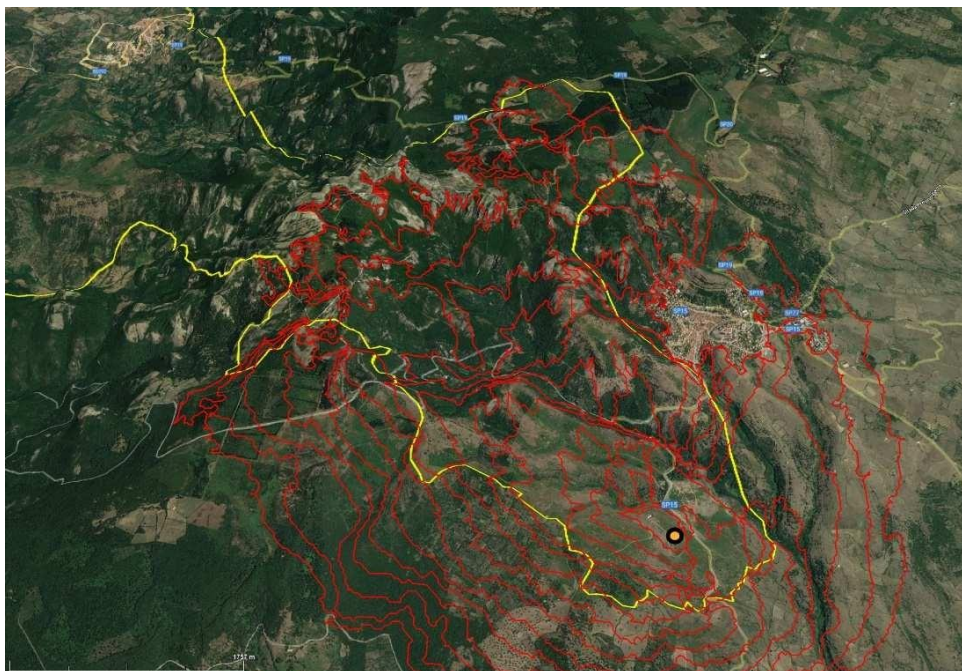


Figure 8 - Périmètre simulé (rouge) et réel (jaune) de la première étape de l'incendie de Montiferru (24/07/2021). Les lignes rouges indiquent la progression de l'incendie simulé pour chaque demi-heure de propagation. Le point de départ est indiqué par le point orange.



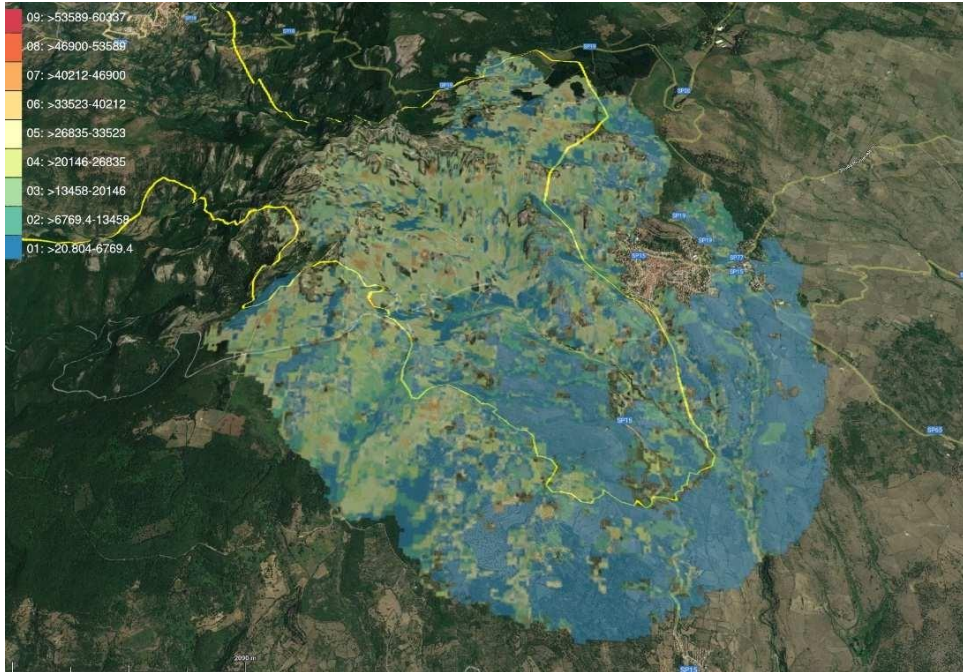


Figure 9 - Carte de la fireline intensity (kw/m) de la première étape de l'incendie de Montiferru (24/07/2021). Les valeurs d'intensité élevées, supérieures à 25 000 kw/m, sont observées dans les zones forestières de haute altitude (nord-ouest) caractérisées par des charges combustibles élevées et une continuité verticale de la végétation.

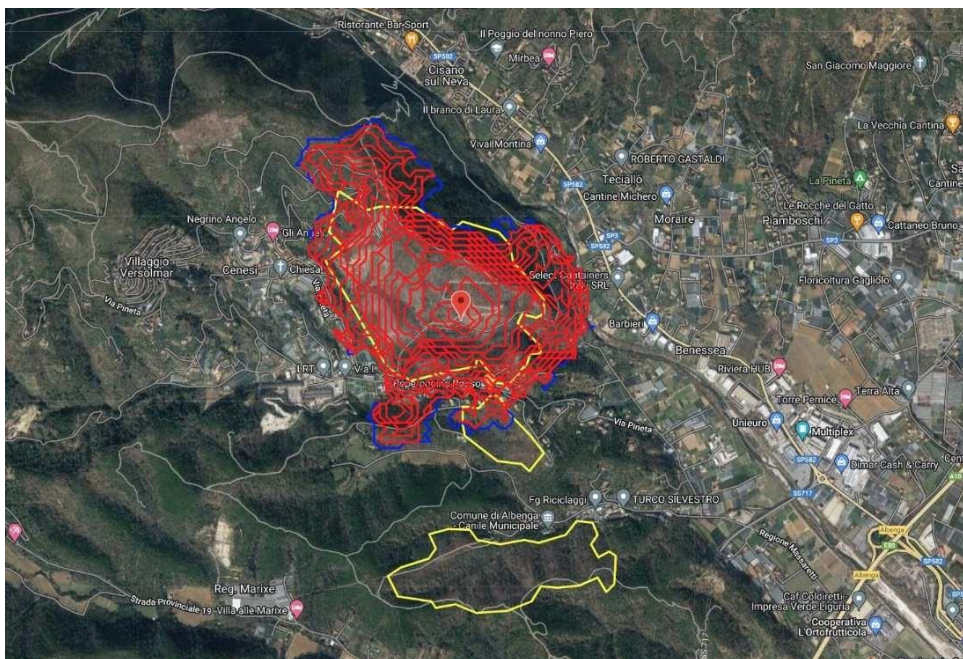


Figure 10 - Périmètre simulé (rouge) et réel (jaune) de l'incendie de Cisano sul Neva (06/09/2021). Les lignes rouges indiquent la progression de l'incendie simulé pour chaque demi-heure de propagation. Le point de départ est indiqué par le pointeur rouge.

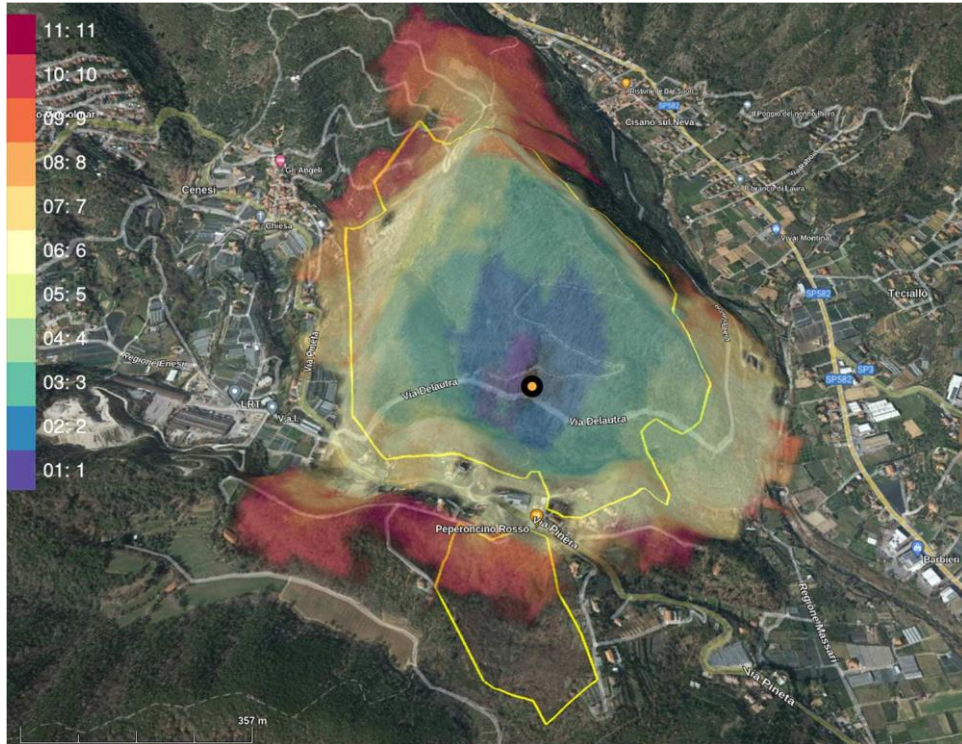


Figure 11 - Carte du temps d'arrivée des flammes en différents points de l'incendie de Cisano sul Neva (06/09/2021), en partant du point de départ (indiqué par le point orange)..



## 4 Conclusions

L'utilisation de simulateurs de propagation du front de flamme permet d'obtenir des informations sur le comportement du feu et d'orienter les activités de lutte contre l'incendie.

Les expériences menées l'été dernier 2022 sur des incendies réels ont montré comment le modèle, bien que soumis à des incertitudes, est capable d'estimer avec une bonne approximation l'ordre de grandeur de la surface brûlée en un temps déterminé. Cela permet de comprendre rapidement l'évolution possible de l'incendie et de soutenir l'organisation d'une stratégie d'intervention de taille appropriée. Le modèle fournit des indications sur les zones où l'intervention peut être plus efficace et sur les zones où la propagation du feu est difficile à contrôler, ce qui permet une meilleure gestion des ressources. Il a récemment été montré comment le modèle peut être utilisé à des résolutions plus élevées (5 m, 10 min), devenant potentiellement un outil utile pour planifier l'intervention des feux prescrits. Une surveillance bien planifiée des feux prescrits pourrait permettre une meilleure calibration paramétrique du modèle afin de le rendre plus fiable. L'exécution de ces sites pourrait constituer un moment de formation unique et important visant à comprendre le processus de propagation du feu dans différents contextes. L'expérience menée dans le cadre du projet a mis en évidence la nécessité de définir un cadre commun pour accéder aux informations d'entrée des différents modèles de propagation du feu, en se concentrant sur les améliorations possibles de la modélisation.