

---

# Simulazione della propagazione di un incendio

Sistemi complessi: modelli e simulazione

Gioele De Pianto  
845002

Vincenzo Corso  
880965

---

---

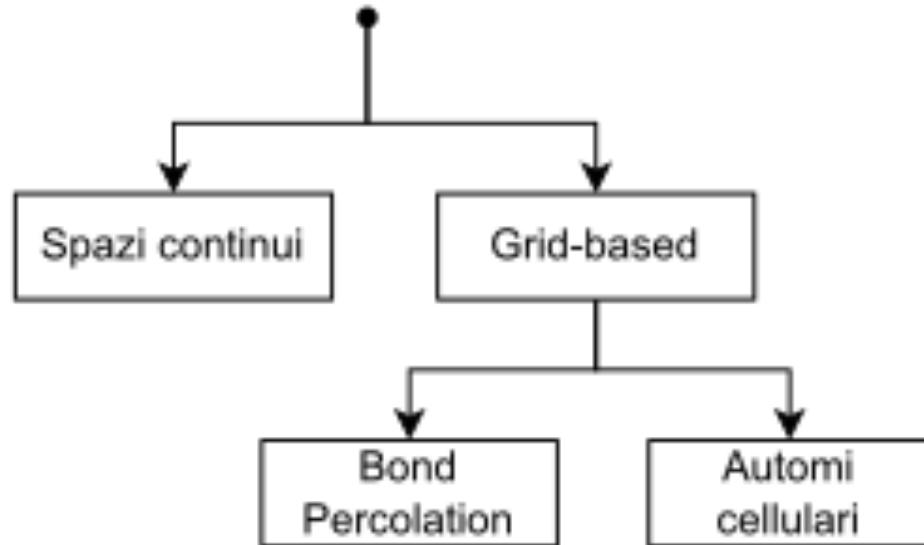
# Introduzione

- Ogni anno gli incendi hanno un grosso impatto
  - È necessario trovare soluzioni efficaci per trattare il problema
  - In entrambi casi sono utili dei modelli matematici per effettuare predizioni
  - Obiettivi del progetto:
    - studiare modelli di simulazione incendi noti in letteratura
    - apportare modifiche e miglioramenti
    - verificare la validità del modello su casi di test e scenari reali
-

# State dell'arte

Le equazioni **Rothermel** sono state un modello pionieristico che ha ispirato molte altre tipologie:

- a spazio continuo (es. sistemi di equazioni differenziali)
- grid-based (spazio discreto):
  - bond-percolation (basato su probabilità)
  - Automi cellulari

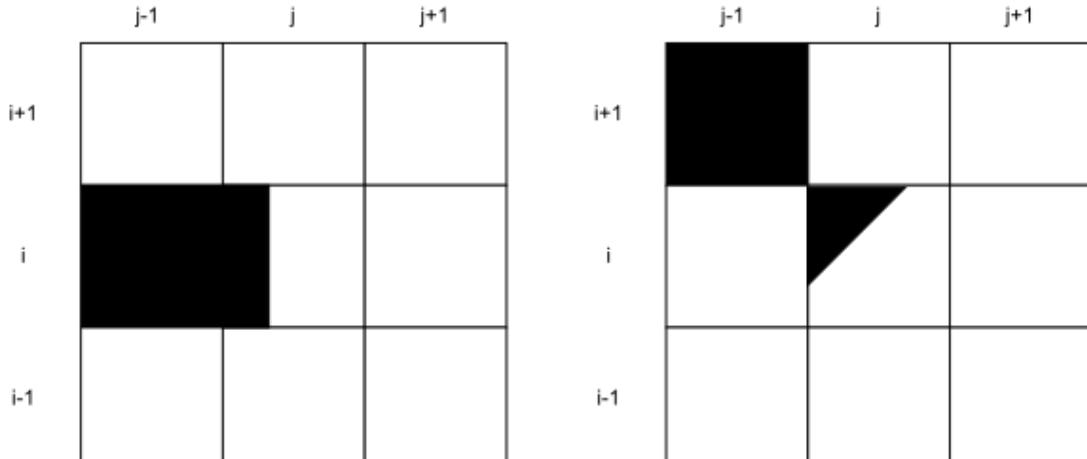


# Modello Karafyllidis et Thanailakis

- Griglia di NxN celle quadrate
- Ogni cella ha lunghezza L
- Stato cella:

$$a_{ij}^{(t)} = \frac{\text{porzione di area bruciata della cella } (i,j)}{\text{area totale della cella } (i,j)}$$

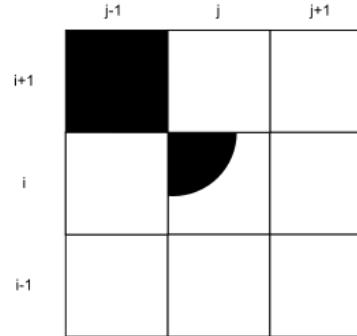
- ogni cella ha tre parametri:
  - rate of spread (RoS)
  - slope
  - wind



$$a_{ij}^{(t+1)} = a_{ij}^{(t)} + \sum_{(\alpha,\beta) \in V_M^{\text{adj}}} h_{i+\alpha,j+\beta} \cdot w_{i+\alpha,j+\beta} \cdot a_{i+\alpha,j+\beta}^{(t)} + 0.83 \sum_{(\alpha,\beta) \in V_M^{\text{diag}}} h_{i+\alpha,j+\beta} \cdot w_{i+\alpha,j+\beta} \cdot a_{i+\alpha,j+\beta}^{(t)}$$

# Modello Encinas

Estende il modello precedente  
migliorando la propagazione in  
diagonale.



$$a_{ij}^{(t+1)} = \frac{R_{ij}}{R} \cdot a_{ij}^{(t)} + \sum_{(\alpha, \beta) \in V_M^{\text{adj}}} h_{i+\alpha, j+\beta} \cdot w_{i+\alpha, j+\beta} \cdot \frac{R_{i+\alpha, j+\beta}}{R} \cdot a_{i+\alpha, j+\beta}^{(t)} + \sum_{(\alpha, \beta) \in V_M^{\text{diag}}} h_{i+\alpha, j+\beta} \cdot w_{i+\alpha, j+\beta} \cdot \frac{\pi R_{i+\alpha, j+\beta}^2}{4R^2} a_{i+\alpha, j+\beta}^{(t)}$$

# Modello Alexandridis

Approccio probabilistico nella  
propagazione del fuoco tra due celle

$$p_{\text{burn}} = p_h(1 + p_{\text{veg}})(1 + p_{\text{den}})p_w p_s$$

A. Hernandez Encinas et al. "Simulation of forest fire fronts using cellular automata". In: Advances in Engineering Software 38.6 (2007). Advances in Numerical Methods for Environmental Engineering, pp. 372–378. issn: 0965-9978. doi: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2006.09.002>

A. Alexandridis et al. "A cellular automata model for forest fire spread prediction: The case of the wildfire that swept through Spetses Island in 1990". In: Applied Mathematics and Computation 204.1 (2008), pp. 191–201. issn: 0096-3003. doi: <https://doi.org/10.1016/j.amc.2008.06.046>.

# Modello proposto

Il nostro lavoro consiste in  
un'estensione del modello Encinas con  
le seguenti modifiche:

- calcolo componenti vento e slope tramite funzioni definite in Alexandridis
- considerazione di folate di vento
- componente pioggia
- aggiornamento dinamico delle componenti vento e pioggia al passare del tempo

$$a_{ij}^{(t+1)} = \left( \frac{R_{ij}}{R} \cdot a_{ij}^{(t)} \cdot sr_{i,j}^{(t)} + adj_{i,j}^{(t)} + diag_{i,j}^{(t)} \right) \cdot p_{i,j}^{(t)}$$

$$adj_{i,j}^{(t)} = \sum_{(\alpha,\beta) \in V_M^{\text{adj}}} h_{i+\alpha,j+\beta} \cdot w_{i+\alpha,j+\beta} \cdot \frac{R_{i+\alpha,j+\beta}}{R} \cdot sr_{i+\alpha,j+\beta}^{(t)} \cdot a_{i+\alpha,j+\beta}^{(t)}$$

$$diag_{i,j}^{(t)} = \sum_{(\alpha,\beta) \in V_M^{\text{diag}}} h_{i+\alpha,j+\beta} \cdot w_{i+\alpha,j+\beta} \cdot \frac{\pi R_{i+\alpha,j+\beta}^2}{4R^2} \cdot sr_{i+\alpha,j+\beta}^{(t)} \cdot a_{i+\alpha,j+\beta}^{(t)}$$

## Componente slope

- $E_1$  ed  $E_2$  altezze (in metri) delle due celle
- $l$  lunghezza cella
- $\delta$  parametro di tuning

$$h_{i+\alpha,j+\beta} = e^{\delta \theta_s}$$

$$\theta_s = \arctan\left(\frac{E_1 - E_2}{l}\right)$$

$$\theta_s = \arctan\left(\frac{E_1 - E_2}{l\sqrt{2}}\right)$$

## Componente vento

- $\theta$  angolo tra direzione vento e direzione incendio
- $V$  velocità vento (m/s)
- $c_1$  e  $c_2$  parametri di tuning

$$w_{i+\alpha,j+\beta} = e^{c_1 \cdot V} f_t$$

$$f_t = e^{V \cdot c_2 \cdot (\cos \theta - 1)}$$

-

## Componente pioggia

### Soppressione delle fiamme

$$p_{i,j}^{(t)} = \begin{cases} 1 & \text{se } P_{i,j}^{(t)} \leq 2 \\ 0.2 & \text{se } P_{i,j}^{(t)} \geq 35 \\ 1 - (0.0242424242424 \cdot P_{i,j}^{(t)}) - 0.0484848484848 & \text{altrimenti} \end{cases}$$

### Riduzione del Rate of Spread

$$sr_{i,j}^{(t)} = \begin{cases} sr_{i,j}^{(t-1)} \cdot 0.5, & \text{se } P_{i,j}^{(t)} = 0 \\ 0.2, & \text{se } P_{i,j}^{(t)} \geq 66 \\ 1 - (0.012 \cdot P_{i,j}^{(t)}), & \text{altrimenti} \end{cases}$$

P = quantità di pioggia (m/h) nella cella (i,j) al tempo t

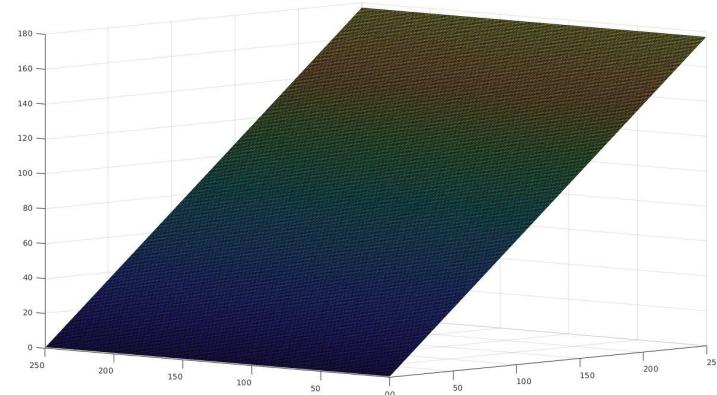
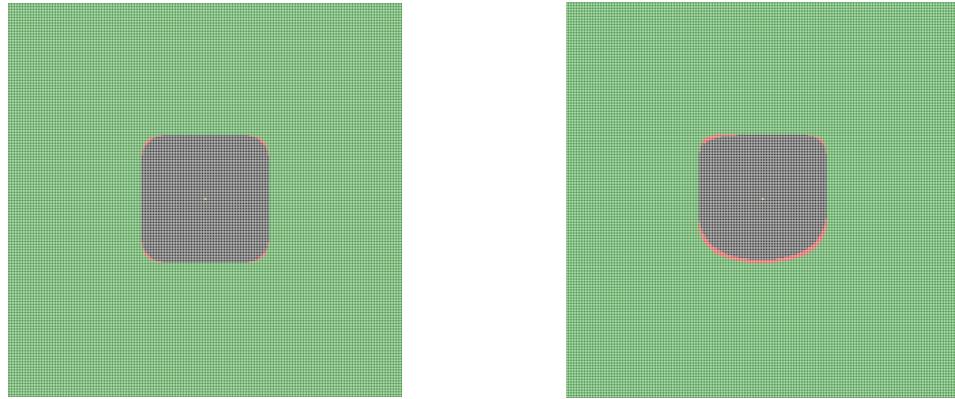
# Validazione su casi di test

Primo caso di test:

- ROS omogeneo
- assenza di slope, vento e pioggia

Secondo caso di test:

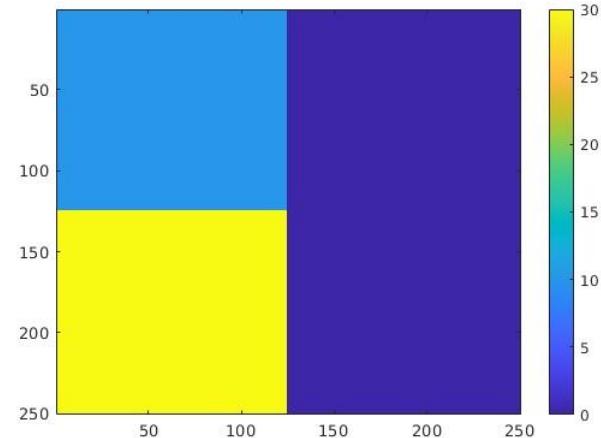
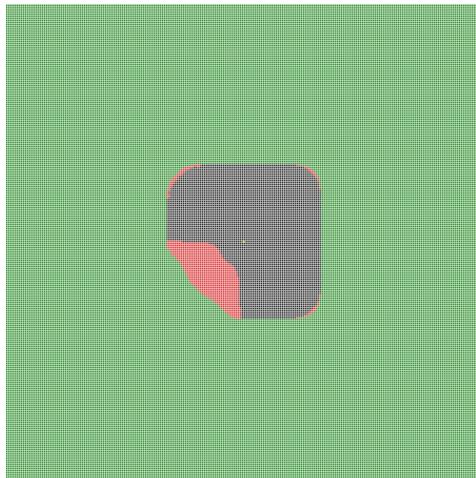
- ROS omogeneo
- piano inclinato di 45°
- vento con direzione da Sud a Nord a 5 km/h



# Validazione su casi di test(2)

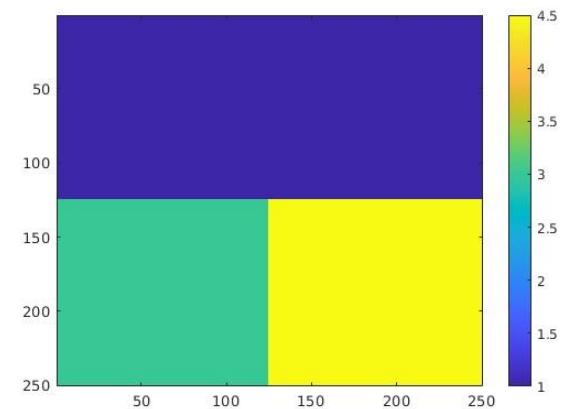
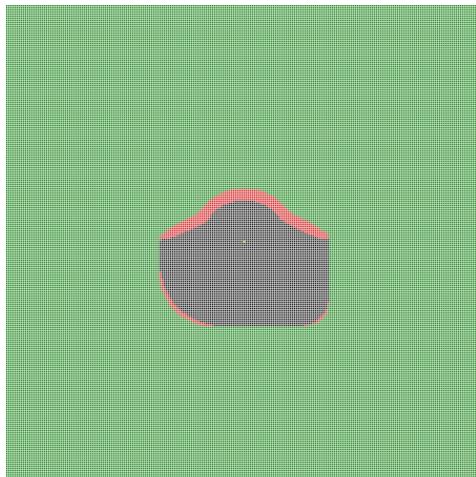
Terzo caso di test:

- ROS omogeneo
- assenza di slope e vento
- presenza di pioggia (0 mm/h, 10 mm/h e 30 mm/h)



Quarto caso di test:

- ROS non omogeneo (valori 1, 3 e 4.5)
- assenza di slope, vento e pioggia

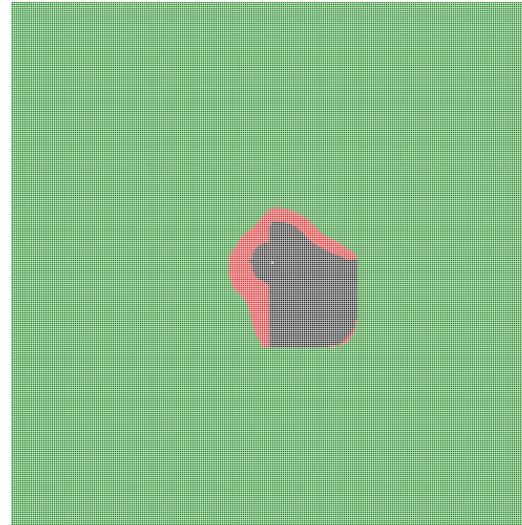


# Validazione su casi di test(3)

Quinto caso di test:

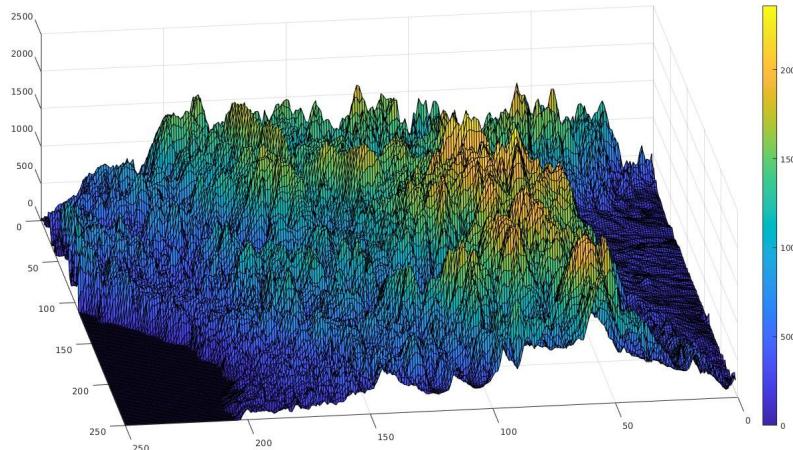
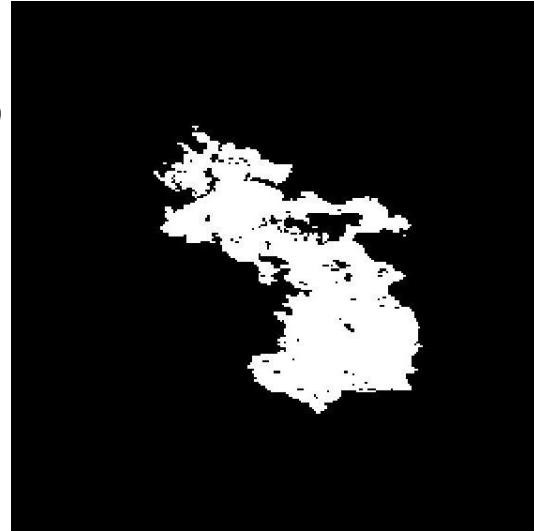
- ROS non omogeneo
- assenza di slope e vento
- presenza di pioggia (0 mm/h, 10 mm/h e 30 mm/h)

Le dinamiche di propagazione in casi ideali sono aderenti alla realtà ed hanno ottenuto risultati simili a quelli dei modelli che sono stati estesi.



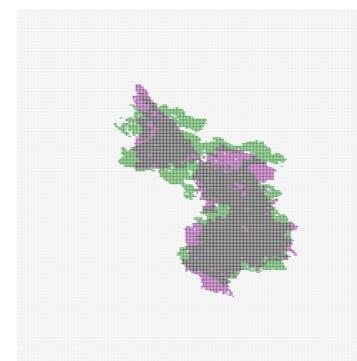
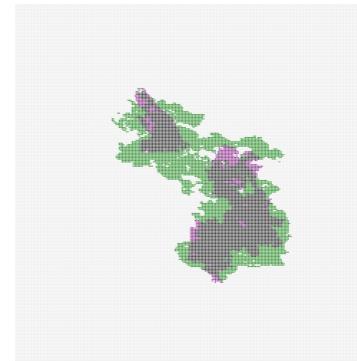
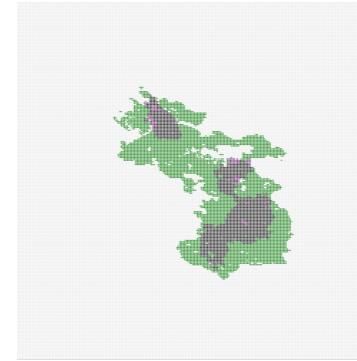
# Caso di studio: August Complex Fire(1)

- incendio iniziato nell'agosto 2020 nel nord California
- definitivamente contenuto a metà novembre 2020
- formato dall'unione di diversi incendi (Doe Fire, Glade, etc.)
- dati su burned mask, elevation e pioggia ottenuti da AppEEARS
- dati su SC ottenuti da Copernicus
- dati su vento ottenuti da stazione meteorologiche



# Caso di studio: August Complex Fire(2)

- tuning dei parametri  $c_1$ ,  $c_2$  e  $\delta$  attraverso Grid Search
- per  $c_1$  e  $c_2$  provati valori {0.125, 0.25, 0.5, 0.75, 1.5}
- per  $\delta$  provati valori {30, 45, 60, 75, 90}
- valori scelti:
  - $c_1 = 0.25$
  - $c_2 = 0.5$
  - $\delta = 45$
- metriche utilizzate:
  - f1-measure
  - precision
  - recall



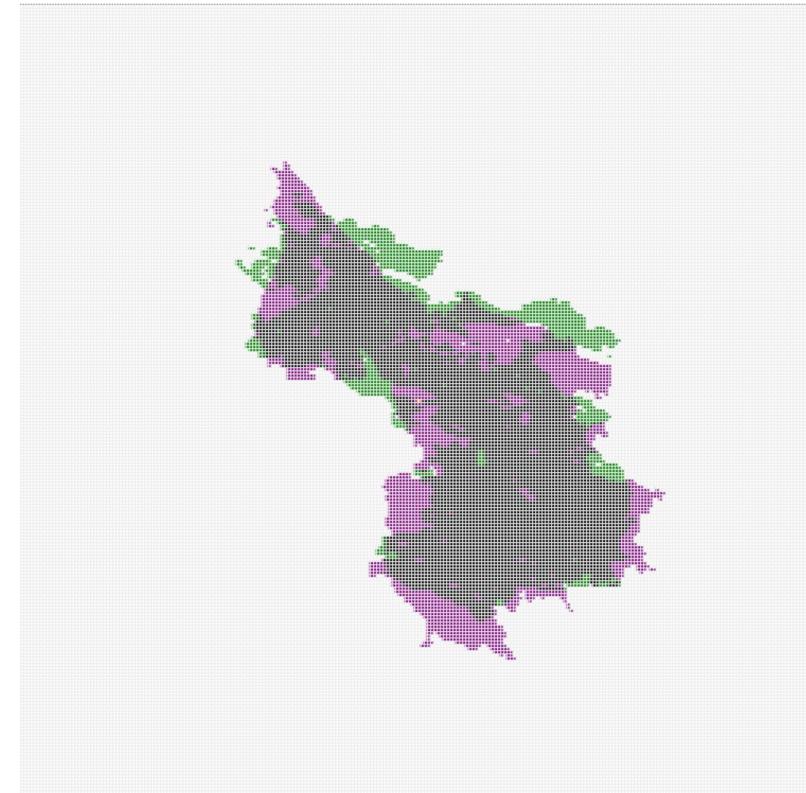
# Caso di studio: August Complex Fire(3)

- risultati ottenuti allo step 38:
  - f1-measure = 0.7995
  - precision = 0.737
  - recall = 0.8735

Come si può osservare si ottiene una buona copertura dell'area bruciata.

Limitazioni dovute a:

- non è stato considerato l'intervento umano
- bassa risoluzione della mappa dello Spread Component
- utilizzo dell'interpolazione bicubica per il ridimensionamento delle mappe
- dati riguardanti il vento provenienti da una sola stazione meteorologica



---

# Sviluppi futuri

- utilizzo di griglie 500x500 oppure 1000x1000
- algoritmi di ottimizzazione più avanzati (come Nelder-Mead)
- aggiunta di altri fattori come temperatura ed umidità
- considerare incendi spontanei ed eventi di spotting