



Un modello matematico semplificato per la simulazione dello **spotting**

■ Luca Manselli

L'abstract

Il fenomeno dello "Spotting fire" consiste nella propagazione dell'incendio al di fuori del perimetro del fuoco principale, a causa del sollevamento in aria di tizzoni, parti di legno e corteccia in fiamme da parte di correnti convettive generate dalla combustione del fuoco; le particelle ardenti, sospinte dal vento, generano fuochi secondari. Tale processo avviene in continuazione in tutti i casi di combustione di arbusti. Parti di corteccia, foglie, pigne e piccoli rami sono i principali responsabili del fenomeno.

Lo "spotting" avviene spesso con distanze dell'ordine di decine di metri ed in alcuni casi può avvenire con distanze maggiori, da centinaia di metri ad alcuni chilometri.

Esistono numerosi modelli per rappresentare il fenomeno dello "spotting" basati su incendi di vaste dimensioni e con abbondanza di dati.

Il presente articolo, scaturito da un fatto realmente accaduto, considera un modello matematico semplificato da adoperarsi nei casi di piccoli incendi con scarsità di dati.

Il caso reale riguarda la propagazione di un incendio da un modesto fuoco, acceso per la pulizia di un fondo, che per propagazione mediante spotting, ha provocato un incendio interessando una abitazione posta ad un centinaio di metri. Nonostante le ipotesi estremamente semplificate, poste a base della simulazione, i risultati forniti sono interessanti e danno un supporto scientifico alla spiegazione del fenomeno.

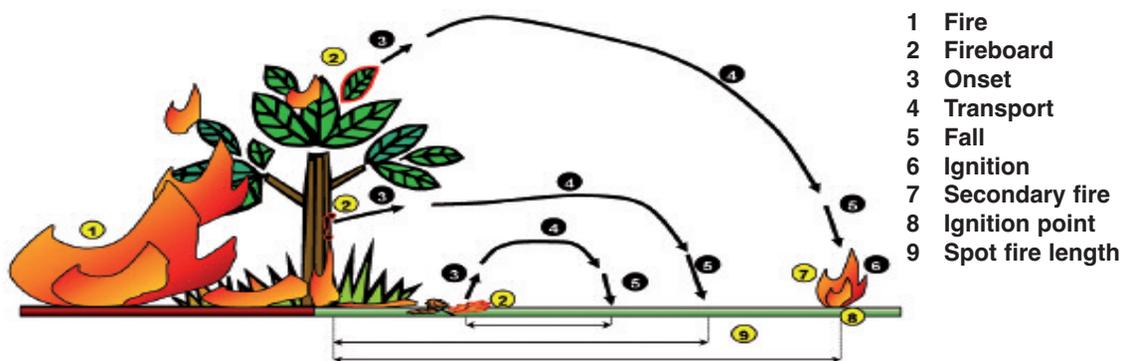


Figura 1 - Schematizzazione del fenomeno dello spotting [11]

Analisi statistica dello “spotting fire”

Il fenomeno dello “spotting fire” è stato approfonditamente analizzato in un programma di studio denominato Saltus [8],[9],[10],[11],[12], richiesto dalla Commission of the European Communities. In tale studio sono stati analizzati, nell’arco di 3 anni, 245 incendi in 5 paesi del Sud Europa, tra cui l’Italia e, in particolare, la Sardegna. I risultati dell’analisi sono molteplici, e riguardano la propagazione di incendi boschivi dovuti al fenomeno dello spotting”. Si riportano i risultati ritenuti significativi.

1. Il fenomeno dello “spotting” è molto comune: il 56 % dei fuochi analizzati hanno prodotto uno o più spot fire ad una distanza maggiore di 10 metri, e nel 32 % dei casi ad una distanza superiore a 100 metri.
2. Le distanze di “spotting” possono essere molto lunghe: sino a 2400 metri (una media di 228 metri).
3. L’accensione di “controfuochi” ha generato fuochi secondari con il fenomeno dello “spotting” 3 volte su 4 (il controfuoco consiste in una tecnica adottata dal personale impiegato alla lotta antincendi

boschivi per contrastare l’avanzamento di un incendio; in particolare si dà deliberatamente fuoco alla vegetazione davanti all’incendio in modo da esaurire preventivamente il combustibile, cioè gli arbusti, ed arrestare il processo di combustione).

4. La dislocazione del fuoco con il fenomeno dello “spotting” non dipende dal grado di copertura della vegetazione arborea.
5. “Spotting” che generano nuovi fuochi sono stati osservati su distanze che oscillano tra 5 e 1200 metri. Sono molto frequenti entro i 50 metri e decrescono all’aumentare della distanza.
6. Fuochi che bruciano in presenza di una velocità media del vento superiore a 2 m/sec, sono molto spesso la causa di spot fires (con distanze maggiori di 10m o maggiori di 100m). Si noti che il limite di velocità di 2 m/sec è relativamente basso e corrisponde a situazioni di calma di vento.
7. Lo studio dimostra inoltre che gli “spot fires” possono interessare non soltanto il perimetro inabitato del bosco, ma anche piccoli aggregati di case, paesi e periferie.
8. Il fenomeno dello “spotting” rende possibile sostenere tesi che prima, a causa di una mancanza di conoscenze scientifiche, non era possibile dimostrare. Nel passato infatti gli esperti sostenevano che gli “spot fires” oltre diverse centinaia di metri, fossero impossibili e concludevano sostenendo che tali incendi potevano avere solo origine dolosa.

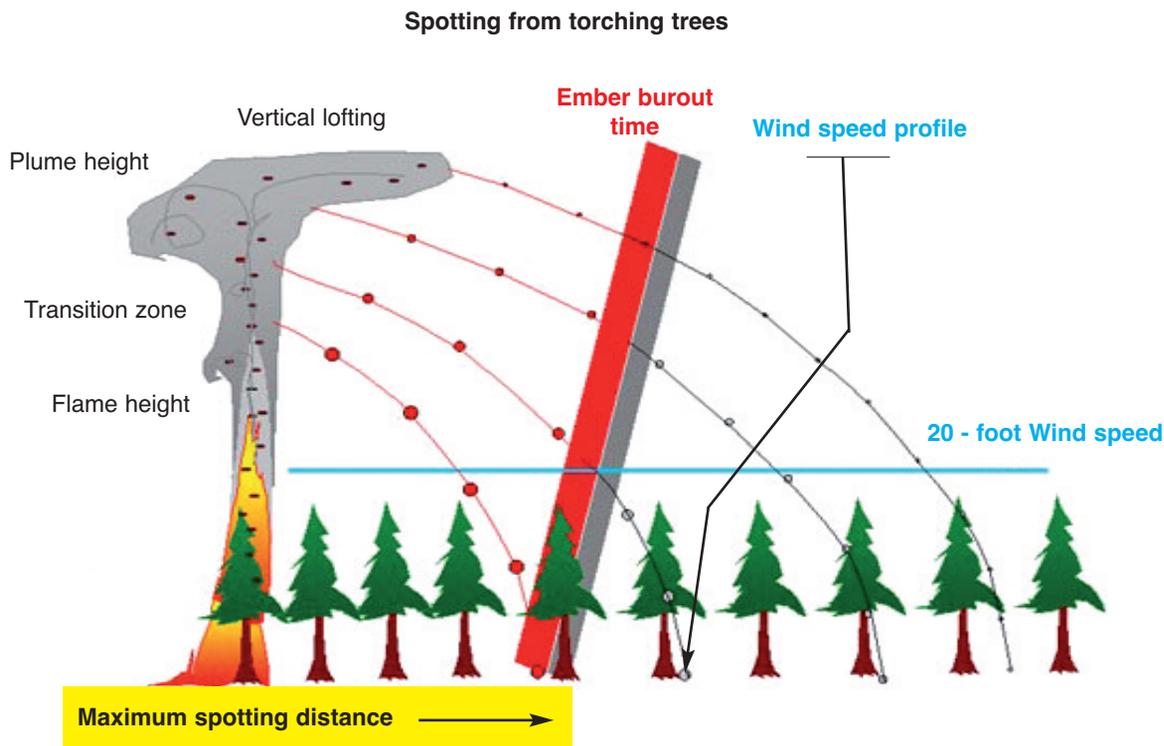


Figura 2 - Caso di particelle ardenti che sono trasportate ad altezze dell'ordine dei chilometri [13]

9. I terreni collinosi favoriscono il verificarsi di "spot fires" su distanze molto lunghe. Studi condotti con soluzioni numeriche confermano che un terreno collinare influenza l'azione del vento e la colonna convettiva prodotta dal fuoco, anche se la correlazione tra la pendenza e ed il fenomeno non è stata numericamente parametrizzata.

Il modello matematico semplificato

I modelli numerici di settore [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 13, 14] sono elaborati per distanze di "spotting" molto lunghe, per incendi di notevoli estensioni, con velocità del vento misurata mediante anemometro, tengono conto della specie vegetale oggetto della combustione e della perdita di massa delle particelle che sono oggetto dello "spotting".

Il caso studio riguarda un incendio avvenuto

anni fa, con conoscenze basate su pochi dati ricavabili direttamente e su alcuni dati riportati da testimoni. In particolare non potevano essere adottati i modelli matematici di settore in quanto questi ultimi sono elaborati per:

- distanze dell'ordine di migliaia di metri
- specifiche essenze arboree (nel caso in esame non note)
- conoscenza puntuale della intensità del vento
- quantità ed estensione del fuoco sorgente note e cospicue.

Terminologia - Nel seguito si adotterà la seguente terminologia di settore [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 13, 14] adattata al caso in esame:

- "firebrands" saranno indicate con il nome "particelle ardenti"
- "drag force" verrà indicata col nome "forza di sollevamento"
- il fuoco che ha iniziato il processo verrà indicato come "fuoco origine"
- il luogo dove le particelle ardenti hanno

provocato un altro fuoco verrà chiamato “bersaglio”.

La questione presa in esame è la seguente: possono particelle ardenti, provenienti dal fuoco origine, essere in grado di accendere (provocando un altro fuoco) materiale infiammabile collocato nel bersaglio posto ad una distanza D ed ad una altezza h rispetto al fuoco origine?

I modelli ricordati precedentemente non sono applicabili alla questione che si vuole esaminare perchè i dati sono scarsi o mancanti ed il fuoco origine è assai modesto e non si hanno puntuali informazioni su di esso. Si è quindi preferito costruire un modello semplificato, che al termine propone un quesito; una eventuale risposta affermativa al quesito, equivale ad una risposta positiva alla questione precedente. Le poche informazioni a disposizione sono le seguenti.

- Il fuoco origine, acceso per eliminare delle sterpaglie, ha bruciato per un paio d'ore, sviluppando certamente una forza di sollevamento non trascurabile delle particelle combuste ed ardenti.
- Il fuoco origine è stato acceso di mattina in una zona non lontana dal mare. La brezza di mare soffiava dal fuoco origine verso il materiale infiammabile bersaglio, posto ad una altezza h maggiore rispetto al fuoco origine (dislivello dell'ordine di 15 m).
- La massa M della particella ardente modello era molto piccola (dell'ordine di un grammo), D è dell'ordine di 60 m. Visto che il tragitto è breve, è ragionevole assumere che la perdita di massa della particella ardente sia trascurabile, così da considerare M non dipendente dal tempo.

In un contesto geometrico la questione si

può schematizzare nel modo seguente.

Si considera un piano cartesiano con coordinata orizzontale x e verticale z .

Si assume che il fuoco origine abbia coordinate $(0, 0)$ e che il bersaglio abbia coordinate (D, h) .

Quindi il piano cartesiano rappresenta il piano verticale che congiunge il fuoco origine ed il punto bersaglio e su cui si svolge il moto della particella ardente.

Poiché non si può dire nulla della forza di sollevamento in quanto non si conosce la intensità del fuoco origine, si assume che la particella ardente inizi il suo tragitto dal punto $(0, z_0)$, ossia che la forza di sollevamento (che imprime alle particelle combuste ed ardenti una notevole accelerazione) abbia già portato, al tempo $t = 0$ la particella ardente nel punto $(0, z_0)$; imprimendole una velocità verticale \bar{v} .

Si indica con v_0 la intensità della velocità della brezza di mare, che si assume soffi da $(0, 0)$ verso (D, h) ; si assume quindi che la brezza di mare sia rappresentata da un vettore velocità di intensità v_0 , parallelo al segmento orientato che congiunge l'origine con (D, h) . Allora il vettore velocità della brezza di mare forma con l'asse x un angolo $\phi = \arctan h/D$. Si considera il moto della particella ardente soggetto alla forza peso ed ad un attrito viscoso. Le equazioni di moto sono riportate nello *schema 1*.

Siccome durante il moto, \dot{x}^2 e $v_0 \sin \phi$ sono piccoli, si può trascurare l'addendo \dot{x}^2 nella prima equazione e l'addendo $v_0 \sin \phi$ nell'ultima equazione.

Allora le equazioni del moto diventano quelle riportate nello *schema 2*.

Il termine $-\frac{L}{M} \dot{z}|\dot{z}|$, è l'attrito viscoso che diventa $-\frac{L}{M} \dot{z}^2$ nel tratto ascendente, per z

Schema 1
$$\begin{cases} M \ddot{x} = -L \dot{x}^2 & x(0) = 0, & \dot{x}(0) = v_0 \cos \phi \\ M \ddot{z} = -Mg - L \dot{z}|\dot{z}| & z(0) = z_0, & \dot{z}(0) = \bar{v} + v_0 \sin \phi \end{cases} \quad (1)$$

Schema 2
$$\begin{cases} \ddot{x} = 0, & x(0) = 0, & \dot{x}(0) = v_0 \cos \phi, \\ \ddot{z} = -g - \frac{L}{M} \dot{z}|\dot{z}|, & z(0) = z_0, & \dot{z}(0) = \bar{v}. \end{cases} \quad (2)$$

che cresce da z_0 fino alla quota del punto più alto della traiettoria (che indicheremo con z_1) e vale $-\frac{L}{M} \dot{z}^2$

per z che decresce da z_1 fino ad h .

Il problema iniziale da affrontare è il seguente.

Dati

- $O = (0, 0)$ coordinate del fuoco origine
- ϕ angolo (in radianti) tra la congiungente origine - bersaglio e l'asse x
- $(0, z_0)$ coordinate del punto di partenza della particella ardente
- (D, h) coordinate del candidato punto bersaglio
- v_0 (in metri/secondi) intensità della velocità della brezza di mare
- \bar{v} (in metri/secondi) intensità della velocità iniziale della particella ardente
- M (in Kg) massa della particella ardente
- L (in Kg/metri) coefficiente di viscosità
- $N = L/M$

Determinare la traiettoria $(x(t), y(t))$ delle particelle ardenti, governate dalla legge di moto (2). Si ha facilmente

$$x(t) = t v_0 \cos \phi \quad (3)$$

La equazione differenziale della legge di moto di $z(t)$ è elementarmente integrabile e se $z \geq 0$ tenendo conto delle condizioni iniziali, posto:

$$t_1 = \frac{1}{\sqrt{gN}} \arctan \left(\sqrt{\frac{N}{g}} \bar{v} \right) \quad (4)$$

si ha:

$$z(t) = z_0 - \frac{1}{2N} \log \left(\frac{1 + \tan^2 \sqrt{gN} (t-t_1)}{1 + \frac{N \bar{v}}{g}} \right) \quad (5)$$

come è immediato verificare dalla equazione del moto e dalle condizioni iniziali.

L'istante t_1 è quello in cui la quota è massima: si ha $\dot{z}(t_1) = 0$; la quota massima risulta

$$z_1 = z(t_1) = z_0 + \frac{1}{2N} \log \left(1 + \frac{N \bar{v}}{g} \right) \quad (6)$$

Se $t \geq t_1$; le equazioni del moto diventano:

$$\ddot{z} = -g + \frac{L}{M} \dot{z}^2, \quad z(t_1) = z_1, \quad \dot{z}(t_1) = 0; \quad (7)$$

la soluzione è

$$z(t) = z_1 + \frac{1}{2N} \log \left(1 - \left[\tanh \left(\sqrt{gN} (t-t_1) \right) \right]^2 \right) \quad (8)$$

come si vede sostituendo nella (7).

Quindi la legge di moto della particella modello è data dalla (3), dalla (5) per $0 \leq t \leq t_1$ e dalla (8) per $t \geq t_1$.

Dalla legge di moto segue che

$$x(t_2) = D \text{ se } t_2 = \frac{D}{v_0 \cos \phi}$$

quindi la traiettoria passa per il bersaglio (D, h) se $z(t_2) = h$ ossia se

$$h = z_1 + \frac{1}{2N} \log \left(1 - \left[\tanh \left(\sqrt{gN} \left(\frac{D}{v_0 \cos \phi} - t_1 \right) \right) \right]^2 \right)$$

Sostituendo nella ultima equazione a t_1 ed a z_1 le espressioni esplicite e svolgendo semplici calcoli algebrici si ottiene la seguente relazione di compatibilità tra i dati

$$e^{2N(h-z_0)} = \frac{1 + \frac{N}{g} \bar{v}^2}{\cosh^2 \left(\frac{D}{v_0 \cos \phi} - \frac{1}{\sqrt{gN}} \arctan \left(\sqrt{\frac{N}{g}} \bar{v} \right) \right)} \quad (9)$$

La (9) comporta una relazione tra i dati necessaria e sufficiente, se si vuole che la particella ardente da $(0, z_0)$ arrivi ad (h, D) .

Nella (9) risultano noti h ; D ; N mentre z_0 ; v_0 ; \bar{v} vanno scelti compatibilmente con il fenomeno reale; due di tali dati possono essere scelti (per esempio z_0 ; v_0) basandosi sulle informazioni di massima possedute. Risolvendo la (9) con il metodo di Newton si ricava \bar{v} . Ci sono due possibilità.

- (i) Il valore di \bar{v} non è compatibile con il fenomeno reale (per esempio risulta troppo alto). In tal caso il modello fornisce una risposta negativa al quesito.
- (ii) Il valore di \bar{v} risulta compatibile con il fenomeno reale (nè troppo alto, nè troppo basso).

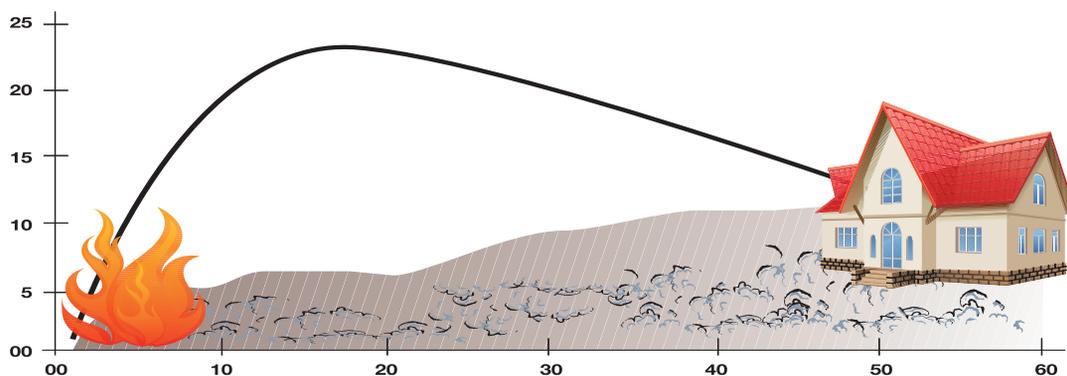


Figura 3 - Grafico della traiettoria della particella ardente ottenuto integrando numericamente le equazioni del moto. Sono stati riportati il terreno, il rogo e l'abitazione incendiata non in scala ed ai soli fini di comprensione del fenomeno.

In tal caso il modello fornisce una risposta affermativa al quesito. Nel caso studio in questione, partendo da dati compatibili con il caso reale, il valore di \bar{v} ottenuto è risultato anch'esso compatibile con il caso studio, confermando che particelle ardenti ben potevano raggiungere il bersaglio.

Conclusioni

Nonostante i dati disponibili non fossero suf-

ficienti per applicare noti modelli matematici utilizzati per lo studio dello "spotting fire" [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [13], [14], è stato possibile determinare la traiettoria della particella ardente (figura 3) e confermare la causa che ha determinato la propagazione dell'incendio.

Si ritiene che il modello matematico ed il metodo esposti possano essere utilizzati proficuamente in casi analoghi.

Bibliografia

- [1] F.-A. Albini Spot Fire Distance From Burning Trees, USDA Forest Service, Technical Report (1979)
- [2] F.-A. Albini Spot Fire Distance From isolated Sources ..., USDA Forest Service, Technical Report (1981)
- [3] F.-A. Albini & Others A Mathematical Model for Predicting ...Spotting Fires ..., Intl. J. of Wildland Fire (2012)
- [4] M.Almeida, D. X. Viegas, A. I. Miranda, V. Reva Combustibility of potential embers (2008)
- [5] Bhutia S. & Others Comparison of Firebrand Propagation ..., J.A.M.E.S. vol. 2 (2010)
- [6] Samuel L. Manzello, Alexander Maranghides, William E. Mell Firebrand generation from burning vegetation. (2007)
- [7] Samuel L. Manzello, John R. Shields, Thomas G. Cleary, Alexander Maranghides, William E. Mell, Jiann C. Yang, Yoshihiko Hayashi, Daisaku Nii, Tsuyoshi Kurita, On the development and characterization of a firebrand generator
- [8] SALTUS (2001) Spot fires: mechanisms analysis and modeling. EU Project ENV98- CT98- 0701 Thematic Final report WP 100 Probabilistic model
- [9] SALTUS (2001) Spot fires: mechanisms analysis and modeling. EU Project ENV98- CT98- 0701 Thematic Final report WP 240 Wildfires Monitoring
- [10] SALTUS (2001) Spot fires: mechanisms analysis and modeling. EU Project ENV98- CT98- 0701 Thematic Final report WP 220 Experimentation
- [11] SALTUS (2001) Spot fires: mechanisms analysis and modeling. EU Project ENV98- CT98- 0701 Thematic Final report Scientific final report
- [12] SALTUS (2001) Spot fires: mechanisms analysis and modeling. EU Project ENV98- CT98- 0701 Final report
- [13] Nicolas Sardoy, & Others Modeling transport and combustion of firebrands from burning trees (2007)
- [14] Sardoy J.L. Consalvi, A. Kaiss, A.C. Fernandez-Pello, B. Porterie, Numerical study of ground level distribution of firebrands generated by line fires (2008). Forest and Range Experiment Station