

GIUSEPPE AMATULLI (*) - RAFFAELLA LOVREGGIO (**)
VITTORIO LEONE (**)

ANALISI GEO-STATISTICHE PER LA VALUTAZIONE DELLA DISTRIBUZIONE DEGLI INCENDI NELLO SPAZIO RURALE: APPLICAZIONE DELL'ADAPTIVE KERNEL DENSITY ESTIMATION AL TERRITORIO DEL PARCO NAZIONALE DEL GARGANO

La conoscenza della distribuzione spaziale e temporale dei punti di innesco degli incendi appare fondamentale per la stima del rischio. Per meglio integrare le informazioni di tipo areale, è opportuno convertire l'ubicazione, di tipo puntiforme, dei punti di innesco in variabili continue, esprimendo la densità in termini agevolmente interpretabili, per es. come numero di punti per km².

Il presente lavoro illustra una tecnica di rappresentazione della densità dei punti attraverso una variabile continua, mediante la tecnica dell'adaptive kernel interpolation.

L'area di studio, estesa circa 1500 km² e caratterizzata da un'elevata frequenza di incendi, è situata nel promontorio del Gargano. La densità dei punti di innesco è stata valutata considerando tutti gli incendi (583) verificatisi nel periodo 1997-2002. Il lavoro illustra anche le modalità di calibrazione necessarie per adattare il metodo alle condizioni locali.

La mappa ottenuta ha consentito di analizzare la distribuzione degli incendi nel Parco Nazionale del Gargano, autorizzando considerazioni, circa le loro motivazioni, di particolare interesse nell'organizzazione generale dell'attività di prevenzione e controllo.

Parole chiave: interpolazione; densità; frequenza; punti d'innesco.

Key words: kernel density; bandwidth; fire patterns; ignition points; fire occurrence.

PREMESSA

Il moderno approccio alla lotta contro gli incendi boschivi, fenomeno in costante crescita numerica, privilegia le attività di previsione e prevenzione.

Fondamentale, in tale contesto, è la valutazione del rischio di incendio, inteso come la combinazione di due fattori, l'uno di natura predisponente,

(*) Dottore di Ricerca, Università degli Studi della Basilicata, Dipartimento di Scienze dei Sistemi Colturali, Forestali e dell'Ambiente; Istituto di Metodologie per l'Analisi Ambientale (CNR-IMAA). C.da S. Loja I-85050 Tito Scalo (PZ) Fax: +39-0971427271 e-mail: selvaggio.g@libero.it.

(**) Rispettivamente Dottore di Ricerca e Professore Ordinario, Università degli Studi della Basilicata - Dipartimento di Scienze dei Sistemi Colturali, Forestali e dell'Ambiente - C.da Macchia Romana I-85100 - Potenza. Fax: +39-0971205260 e-mail: arbleg1@unibas.it; leone@unibas.it.

rappresentato dal combustibile e dalla sua suscettibilità a prendere fuoco per effetto della variabili ambientali e topografiche (*fire hazard*), l'altro di natura determinante, ovvero le cause esterne (naturali ed antropiche) che rappresentano l'innesco del fenomeno di combustione (*fire ignition*) (CHUVIECO e CONGALTON, 1989).

Nella determinazione del rischio è cruciale la disponibilità di mappe, a scala spazio-temporale differente, basate sulla registrazione dei punti di innesco dei differenti eventi che ne rappresentano la trama storica geo-referenziata. Le mappe possono essere basate sulla indicazione delle coordinate dei punti di innesco, oppure realizzate con metodi di interpolazione e di analisi spaziale, atte a determinare livelli di densità dei punti di innesco (numero di punti di innesco per km²) o valori di probabilità di innesco. Tali strati geografici forniscono informazioni utili per indagare sui rapporti tra fenomeno incendi e fattori causali (KOUTSIAS *et al.*, 2004), tra cui l'identificazione degli *hot spots*, di particolare interesse nella definizione del rischio e nella relativa gestione.

La rappresentazione spaziale dei punti di innesco è utilizzata per la creazione di mappe di rischio, ma l'informazione puntiforme è spesso viziata da errori, riconducibili ad inesattezze nel relativo posizionamento delle coordinate geografiche e ad errori legati alla scala delle mappe utilizzate (DE LA RIVA *et al.*, 2004).

Ciò rende ardua l'applicazione di statistiche che abbiano come requisito di base l'esattezza del punto, introducendo, altresì, errori sostanziali laddove si voglia spiegare la distribuzione spaziale del regime degli incendi o indagare sui fattori casuali che esso sottende. Pertanto, è fondamentale la creazione di strati informativi dei diversi livelli di densità o valori di probabilità, a caratteri continuo e coprenti l'intera superficie presa in esame.

La spazializzazione dei punti di innesco sull'intera superficie può essere fatta in diversi modi, considerando la relativa distanza tra i punti e quindi il grado di concentrazione. Uno dei più semplici, e forse il più usato, utilizza la distribuzione degli eventi sul territorio preso in esame, attribuendo un valore di densità costante sul territorio, senza fornire alcuna informazione sulla variabilità spaziale della densità. Altro metodo, che non considera la reciproca distanza tra i punti, si basa sul semplice conteggio dei punti ricadenti nelle maglie quadrate a larghezza costante di una griglia sovrapposta (GATRELL *et al.*, 1996).

Per ovviare ai limiti connessi a tale metodo, quali il posizionamento e la larghezza relativa della maglia della griglia, si può utilizzare una finestra mobile che, muovendosi su tutta l'area, conta i punti di innesco ricadenti nella finestra e attribuisce il valore ottenuto al pixel centrale della stessa (BAILEY e GATRELL, 1995). Questo metodo, pur risolvendo il problema del

posizionamento della griglia sovrapposta, non considera la reciproca distanza tra i punti e, di conseguenza, il grado di concentrazione dei punti ricadenti al di fuori della finestra.

Il migliore metodo per stimare il valore della densità si basa su tecniche di interpolazione, che permettono la stima del valore di una determinata variabile in qualsiasi punto di un'area, conoscendo i valori della stessa in determinati punti noti. Esistono molte tecniche di interpolazione, tutte basate sulla determinazione di un parametro direttamente legato alla posizione spaziale dei punti e alla reciproca distanza tra i punti stessi. Le tecniche di interpolazione variano a seconda del tipo di variabile (continua, discontinua), del modello di distribuzione della variabile (unimodale, bimodale, etc.) nello spazio (casuale, aggregata, uniforme, ecc.). Con le tecniche di interpolazione è anche possibile determinare i valori di densità (n° di punti per unità di superficie) di una variabile a carattere puntiforme.

Il presente lavoro propone l'applicazione della tecnica di interpolazione nota come *kernel density estimation*, (KOUTSIAS *et al.*, 2004 e DE LA RIVA *et al.*, 2004) per la determinazione dei livelli di densità dei punti di innesco, illustrando altresì una metodologia per la calibrazione dei parametri del modello statistico *adaptive*, al fine di rendere più flessibile e adattabile la tecnica medesima. La stima della densità è stata determinata in un particolare ambito territoriale, il promontorio del Gargano (Fig. 1), in Italia meridionale, conosciuto come uno degli *hot spots* degli incendi a livello mediterraneo, per la concentrazione particolarmente elevata di incendi, soprattutto di natura dolosa.

AREA DI STUDIO

L'ambito è esteso complessivamente per circa 1500 km² (50 km x 30 km), con morfologia caratterizzata da un esteso altopiano, a versanti collinari e montuosi, a quote variabili tra i 650 e i 900 m, circondato da coste rocciose alte, dove vegetano estese formazioni naturali di *Pinus halepensis* Mill.

La caratteristica dominante del promontorio del Gargano è l'incredibile varietà di paesaggi, che comprendono una frastagliata fascia costiera, estesa per circa ottanta chilometri, la parte interna con i versanti collinari e montuosi, le lagune di Lesina e Varano, zone umide, corsi d'acqua e canali.

Il territorio in esame, nel ventennio 1974-1994, è stato interessato da 3.381 incendi, che hanno percorso complessivamente una superficie di 46.095,20 ha (LEONE e LOVREGLIO, 2003).

Nel quinquennio 1997-2001, il numero di incendi è stato di 606, concentrato, in particolare nei comuni di Vico del Gargano, Vieste,

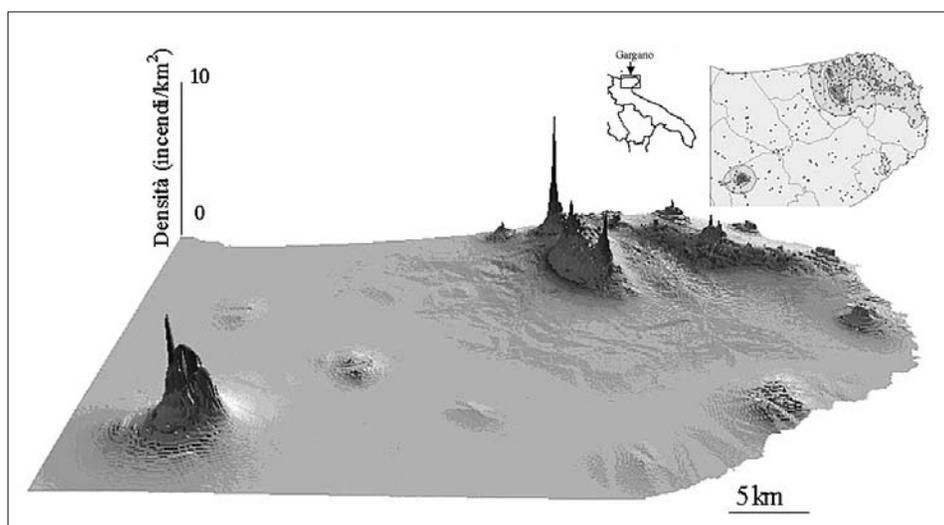


Figura 1 – In alto a destra localizzazione dell'area di studio con confini comunali e distribuzione dei punti di innesco. Al centro rappresentazione grafica in tre dimensioni della variazione della densità. La mappa rappresentata è stata ottenuta utilizzando il metodo *adaptive kernel density estimation*. Il valore variabile del bandwidth è stato calcolato sulla base di un numero minimo di 9 punti. Si notano particolari punti di concentrazione nelle aree di San Giovanni Rotondo (sinistra in basso) e nell'entroterra di Peschici (destra in alto) e Vieste (destra in alto).

Peschici e San Giovanni Rotondo; le annate più critiche sono state il 1997, il 2000 e il 2001.

La caratteristica prevalente del fenomeno è la elevata doloosità, che in taluni Comuni arriva al 90%; complesso è infine il rapporto tra incendi e variabili socio-economiche, ripetutamente analizzato da vari autori (REGIONE PUGLIA, 1996; LEONE *et al.*, 2002; LEONE e LOVREGGIO, 2003).

MATERIALI E METODI

Concetti del *kernel density estimation*

I punti d'innesco degli incendi hanno natura puntiforme e la determinazione della loro densità può essere effettuata attraverso il *kernel density estimation* (BOWMAN e AZZALINI, 1997). Nel caso del *kernel density estimation* (PARZEN, 1962; ROSENBLATT, 1956; CACOULLOS, 1966) ogni singolo punto influisce sulla densità nel suo intorno spaziale, con una funzione probabilistica continua, simmetrica e decrescente attraverso un fattore di regressione che dipende dal tipo di funzione probabilistica (normale, triangolare, quadratica, ecc.) (LEVINE, 2002) e dallo spazio di interpolazione intorno al punto stesso (*bandwidth*).

Le funzioni di densità per ogni singolo punto possono essere cumulate al fine di ottenere la stima della densità finale (LEVINE, 2002). La *kernel density estimation* può quindi essere espressa per n punti (eventi) con coppia di coordinate X_i dalla funzione

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{h} k \left\{ \frac{(x - X_i)}{h} \right\}$$

dove x è la coppia di coordinate nel punto in cui stimare la densità, h è il *bandwidth*, k è la funzione probabilistica, il così detto *kernel*.

Il valore del *bandwidth*, che identifica l'ampiezza dell'intorno circolare della curva probabilistica, e che è solitamente pari alla deviazione standard per funzioni normali, può essere variato e può contribuire a creare una stima della densità con valori attenuati (per valori ampi del *bandwidth*) e accentuati (per valori ridotti del *bandwidth*) con la presenza di picchi e valli (Fig. 2), aumentando, di conseguenza, la variabilità dei valori di densità in tutta l'area. L'ampiezza del *bandwidth* dovrebbe variare in funzione della concentrazione dei punti. Pertanto, considerare un valore costante del *bandwidth* può pregiudicare i valori di densità, sovrastimando o sottostimando il risultato finale (VAN KERM, 2003).

L'inconveniente può essere risolto attraverso un valore variabile del *bandwidth*, che si adatti in funzione della concentrazione dei punti, aumentando in aree con bassa concentrazione di punti e diminuendolo in caso di alta concentrazione. Tale metodo va sotto il nome di *adaptive kernel density*

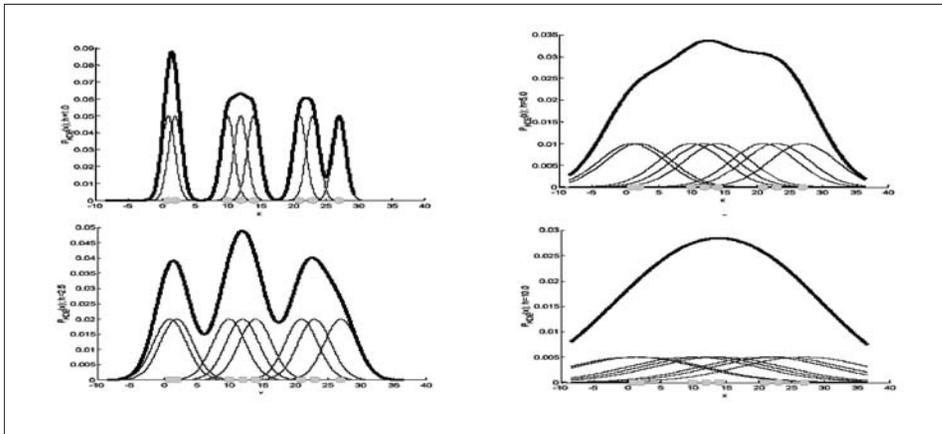


Figura 2 – Rappresentazione grafica della funzione del *kernel density estimation* (color nero marcato). Le funzioni di densità di ogni singolo punto (color grigio) sono cumulate tra loro al fine di ottenere la stima della densità finale. L'ampiezza delle funzioni di densità di ogni singolo punto (*bandwidth*) può essere stretta, come nelle due immagini a sinistra, o ampia come nelle due immagini a destra, e direttamente influenza la stima della densità finale.

estimation (BREIMAN *et al.*, 1997) ed è convenientemente usato per casi in cui si conosce l'esatta posizione spaziale dei punti (LEVINE, 2002). La stima del valore del *bandwidth* per ogni punto è calcolata sull'ampiezza di un intorno circolare, in cui ricade un numero minimo di punti, preventivamente definito. In pratica, il raggio dell'intorno circolare aumenta fino all'inclusione di un numero minimo di punti opportunamente scelto. Il numero minimo di punti influisce direttamente sulla stima del valore di densità; infatti, se si consideri un basso numero minimo di punti, si ottiene una densità eterogenea (con picchi e valli), mentre, con un elevato numero minimo di punti si ottiene una stima della densità più uniforme ed omogenea.

Applicazione del *kernel density estimation* al caso di studio

La rappresentazione grafica della distribuzione dei punti di innesco degli incendi è stata eseguita attraverso il database compilato, ogni anno, dal CFS per il periodo 1997-2002; sono stati selezionati i punti di innesco ricadenti nel Promontorio del Gargano (Fig. 1) in numero pari a 583, ricadenti nei comuni di Vico del Gargano, Vieste, Peschici, Monte Sant'Angelo, Mattinata, Carpino, Ischitella, Rodi Garganico, Cagnano Varano, San Giovanni Rotondo, Sannicandro Garganico, Manfredonia, San Marco In Lamis.

Il computo del *kernel density estimation* è stato effettuato tramite il Free Software CRIMESTAT II[®] (LEVINE, op.cit.) concepito per lo studio e la stima della densità dei casi di criminalità in una data area (*Crime mapping*). L'evento criminoso ha, infatti, carattere puntiforme e segue lo stesso tipo di distribuzione spaziale del punto di innesco. Entrambi gli eventi si verificano in un determinato luogo, riscontrabile tramite coordinate geografiche e, pertanto, ben si adattano all'interpolazione per mezzo della *kernel density estimation*. Il software permette di scegliere il tipo di interpolazione e l'ampiezza del *bandwidth*. Nel caso di studio, è stato scelto il metodo *adaptive kernel density estimation* con una funzione normale (o Gaussiana) per il calcolo della densità relativa espressa in numero di incendi per km².

La determinazione dell'*adaptive bandwidth* si basa su un numero minimo di punti, che può essere variato. In funzione di tale numero si ottengono gradi diversi di densità, più omogeneamente distribuiti nel caso si utilizzino molti punti, più eterogeneamente se si utilizzano pochi punti.

Nel caso in esame sono state create mappe di densità, considerando un numero minimo di 5, 10 e 15 punti (rispettivamente nominate k5, k10 e k15). Conseguentemente, è stato necessario calibrare il numero minimo di punti da utilizzare per il calcolo della densità e stabilire la mappa che meglio la rappresenti, evitando zone con sovrastima o sottostima.

Calibrazione dell'*adaptive kernel density estimation*

Qualsiasi tipo di calibrazione richiede dati che siano veritieri e che rappresentino al meglio, in termini spaziali, la distribuzione dell'evento. La creazione di un strato geografico che spazializza un intorno limitato di ogni punto permette la stima della densità relativa limitrofa. L'ampiezza dell'intorno viene attribuito sulla base della unità di misura della densità (in questo caso n° incendi/km²).

Pertanto, nel caso esaminato è stato calcolato il numero di incendi presenti nell'intorno spaziale di 1 km per ogni zona dell'area di studio. Così facendo si ottiene una mappa che considera la densità solo nell'intorno di un km per ogni *pixel* del *grid*. La mappa così prodotta viene considerata di base per calibrare le mappe create, al fine di scegliere quella che meglio rappresenta la densità dei punti di innesco su tutta l'area.

Nel caso del Gargano è stata utilizzata una finestra mobile di 1 x 1 km che, muovendosi su tutta l'area, ha permesso il calcolo del numero di incendi ricadenti in 1 km². Tale metodo, pur non considerando la reciproca distanza tra i punti e producendo una superficie di densità discontinua, può essere utilizzato per ottenere la curva di frequenza delle variazioni di densità. La curva di frequenza della mappa di densità così creata (mappa della densità di calibrazione) può essere confrontata con le curve di frequenza delle mappe di densità (k5, k10 e k15) ottenute con il metodo *adaptive kernel density estimation*.

Data la funzione di frequenza della mappa di calibrazione $\hat{f}_{cal}(x)$ e la funzione delle mappe ottenute $\hat{f}_{ki}(x)$ la mappa che meglio rappresenta la distribuzione della densità è $\hat{f}_{ki}(x)$ che tende a $\hat{f}_{cal}(x)$. Così facendo si tende a mantenere lo stesso tipo di frequenza di densità, senza sovrastimare o sottostimare la densità relativa dell'area di studio, cercando di mantenere simili, in termini quantitativi, i valori massimi di densità. L'individuazione della $\hat{f}_{ki}(x)$ che maggiormente tende a $\hat{f}_{cal}(x)$ può essere effettuata attraverso la determinazione del coefficiente di Pearson (indicato con r_{cal-ki}) applicato alternativamente alle curve di frequenza ottenute con l'*adaptive kernel density estimation* e alla mappa di calibrazione. Tale coefficiente, oltre a stabilire il migliore valore di calibrazione, fornisce informazioni sulla distanza statistica esistente tra la $\hat{f}_{cal}(x)$ e la $\hat{f}_{ki}(x)$. Successive prove hanno permesso di determinare il numero minimo ottimale di punti da considerare per il calcolo della densità.

La mappa di densità ottenuta consente di quantificare la gravità del fenomeno per i comuni compresi nell'area di studio e di meglio interpretare le motivazioni che sono alla base della relativa concentrazione.

RISULTATI E DISCUSSIONE

Le mappe ottenute con la *kernel density estimation* hanno fornito valori differenti di densità relativa, con valori massimi di 29, 7, 5 incendi per km², rispettivamente per 5, 10 e 15 punti, mentre per la mappa di calibrazione il valore massimo è di 8 incendi/km².

Le curve di frequenza dei valori di densità seguono un andamento esponenziale negativo con coefficienti di determinazione alti ($R^2 = 0,96$ e $R^2 = 0,97$) per un numero minimo di 10 e 15 punti e un più basso valore per 5 punti ($R^2 = 0,61$). La rappresentazione grafica su scala logaritmica ha consentito la trasformazione delle curve di frequenza in rette di frequenza, agevolando così un confronto più immediato dell'andamento (Fig. 3). Il confronto analitico tra le curve di frequenza ottenute con la *kernel density* e la mappa di calibrazione ha permesso di identificare un $r_{\text{cal-ki}}$ di 0,86, 0,98 e 0,97, rispettivamente per un numero minimo di 5, 10 e 15 punti.

Tali valori, supportati anche da un confronto grafico, indicano che la mappa di densità con curva di frequenza più vicina alla curva di calibrazione è quella ottenuta con un numero minimo di 10 punti. Ulteriori prove hanno permesso di calibrare al meglio i parametri del *adaptive kernel density estimation*. Il valore ottimale del numero minimo di punti è stato pari a 9 (Fig. 3) e la relativa curva di frequenza così ottenuta ha un coefficiente di determinazione pari a 0,96. Con tali parametri la mappa di densità presenta valore massimo pari a 9 incendi/km² e una curva di frequenza che si avvicina al meglio alla curva di calibrazione con un $r_{\text{cal-ki}}$ uguale a 0,99.

La mappa di densità ottenuta (Fig. 1) rappresenta in modo veritiero la gravità del fenomeno per i comuni compresi nell'area di studio, identificando la aree più calde.

I risultati ottenuti, evidenziati in Tab. 1, indicano chiaramente che la maggior densità del fenomeno e la sua estensione, in termini di superficie potenzialmente esposta, si presenta in tre differenti ambiti, corrispondenti rispettivamente ai Comuni di Ischitella-Vico del Gargano-Vieste-Peschici, San Giovanni Rotondo-San Marco in Lamis e Mattinata-Monte S. Angelo.

In particolare, nei comuni di San Giovanni Rotondo e San Marco in Lamis e aree limitrofe dell'acrocoro nudo, l'analisi confermerebbe l'ipotesi di collegamento con le attività pastorali, già prospettata dal Piano Regionale di Difesa contro gli Incendi (REGIONE PUGLIA, 1996), ripresa recentemente nel Piano di Previsione, Prevenzione e Lotta Attiva contro gli Incendi Boschivi del Parco Nazionale del Gargano, (LEONE e LOVREGGIO, 2003).

Si tratta, infatti, di vasti incendi in aree interne a scarsa copertura forestale, piuttosto distanti dai luoghi di frequentazione turistica, che coinvol-

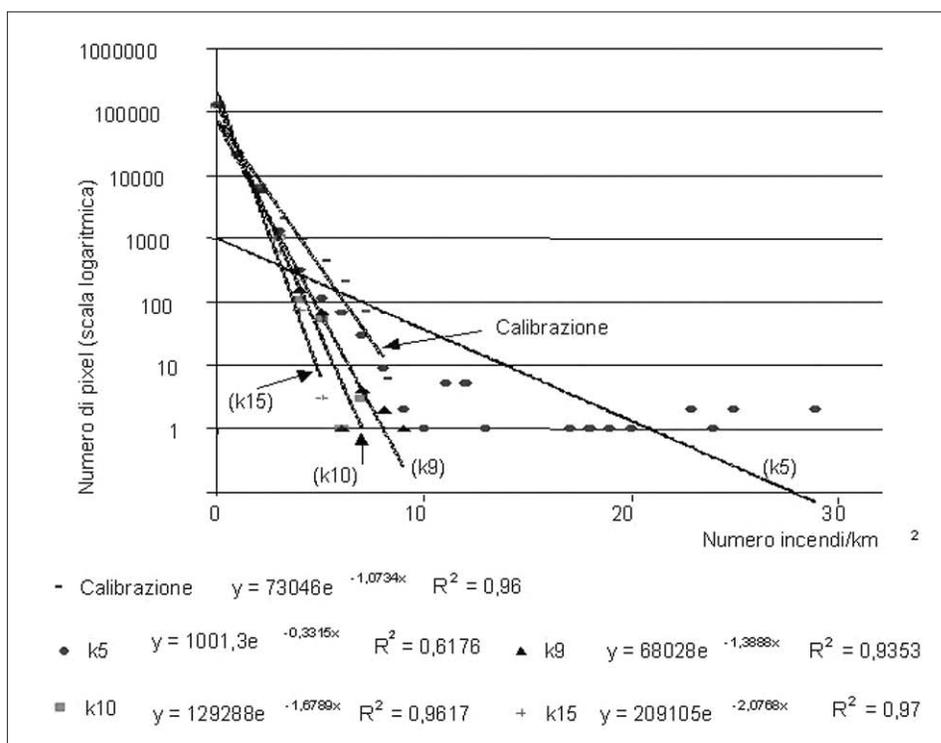


Figura 3 – Curve di frequenza rappresentate su scala logaritmica al fine di facilitare il confronto visuale. Le equazioni delle curve di frequenza sono riportate con i corrispettivi coefficienti di determinazione.

gono ampie superficie non agricole, a pascolo, (Fig. 4) le cui motivazioni potrebbero essere poste in relazione a forme di conflittualità tra forme di allevamento, spesso «senza terra» e agricoltura stabile, che concorrono nel medesimo spazio.

Nell'entroterra dei comuni di Ischitella, Vieste, Vico del Gargano e Peschici la causa dei frequenti incendi, che qui presentano i valori massimi di densità, abitualmente attribuita a problemi di carattere occupazionale (LEONE *et al.*, 2002), ad una più attenta analisi di tipo geografico sembrerebbe invece collegata in maniera sensibile, anche se non esclusiva, a cambiamenti della destinazione d'uso delle aree sublitoranee o interne a pineta, che gradualmente e furtivamente vengono trasformate in impianti di uliveti specializzati, di particolare interesse trattandosi di zona DOP.

Infatti, le zone di innesco del fuoco ricadono frequentemente in prossimità dell'interfaccia bosco/coltivazioni legnose, presentando tra l'altro la tipica *pattern* distributiva dei fuochi agricoli.

Quanto sopra, suffragato tra l'altro dalle ortofoto (Fig. 5), ampia e cir-

Tabella 1 – Determinazione della superficie assoluta percorsa dal fuoco espressa in km² e in percentuale tra parentesi, in funzione del grado di densità (numero incendi per km²) per comune.

Comune/n°incendi/km ²	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Cagnano Varano	165,08 (100)									
Carpino	79,25 (100)									
Ischitella	68,12 (80,62)	16,38 (19,38)								
Manfredonia	15,24 (100)									
Mattinata	67,53 (92,82)	5,22 (7,18)								
Monte Sant'Angelo	234,27 (99,99)	0,03 (0,01)								
Peschici	31,06 (63,59)	17,70 (36,23)	0,09 (0,18)							
Rignano Garganico	1,36 (100)									
Rodi Garganico	7,85 (58,63)	5,53 (41,32)	0,01 (0,05)							
San Giovanni Rotondo	104,67 (79,23)	20,39 (15,43)	3,78 (2,86)	1,82 (1,38)	0,88 (0,67)	0,52 (0,39)	0,01 (0,01)	0,04 (0,03)		
San Marco in Lamis	107,72 (95,74)	4,80 (4,26)								
Sannicandro Garganico	20,09 (100)									
Vico Del Gargano	29,03 (26,41)	42,80 (38,94)	29,55 (26,89)	7,72 (7,02)	0,64 (0,58)	0,14 (0,13)			0,01 (0,01)	0,01 (0,01)
Vieste	81,04 (48,50)	73,43 (43,95)	12,08 (7,23)	0,53 (0,32)						

costanza le motivazioni comunemente accettate, secondo cui molti focolai appiccati nel Gargano sarebbero connessi a motivi occupazionali, interessando spesso proprietà forestali demaniali e privilegiando ambiti dove risulta più agevole l'intervento di ricostituzione del soprassuolo danneggiato e/o distrutto.

Le mappe di densità, in ogni caso, evidenziano che il fenomeno appare più rilevante nelle aree interne rispetto a quelle costiere, ponendo rilevanti dubbi anche sulle motivazioni semplicisticamente riconducibili al turismo.

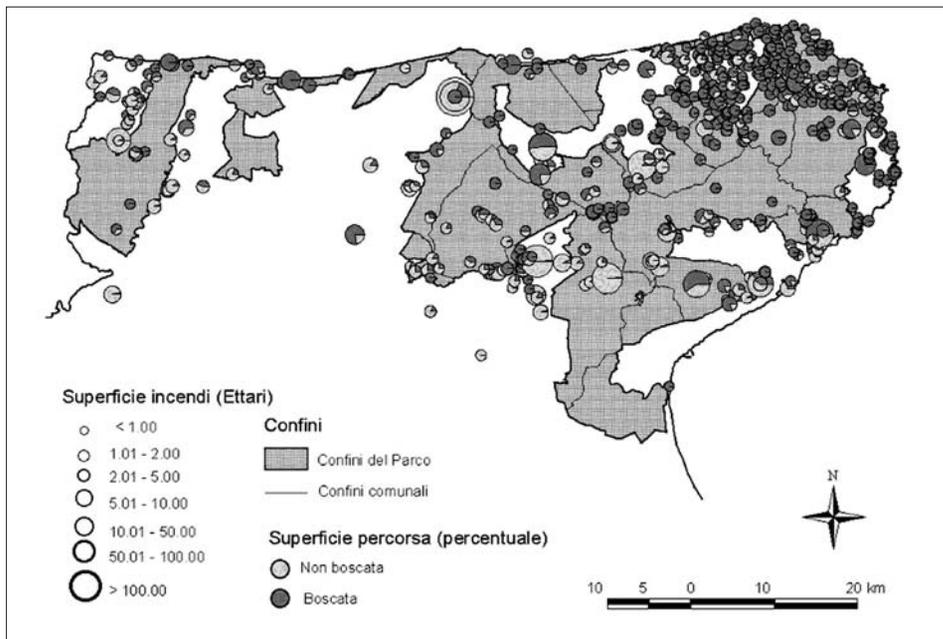


Figura 4 – Superfici boscate e non boscate percorse dal fuoco dal 1997 al 2002.



Figura 5 – Sovrapposizione dei punti di innesco su ortofoto. Il poligono racchiude un'area con densità di 3 punti di innesco/km². Notare come i punti interessino aree già trasformate di recente in oliveto o lembi residui di bosco.

CONCLUSIONI

Le mappe di densità risultano di fondamentale importanza per analizzare il fenomeno incendi in tutti i suoi aspetti. La trasformazione del dato da puntiforme a superficie continua permette, infatti, analisi spaziali specifiche, con l'uso di dati continui che informano sul grado di densità in un determinato intorno, minimizzando gli effetti di imprecisione del dato puntuale.

Il valore minimo di punti ottenuto con il processo di calibrazione è, ovviamente, specifico per ogni area di studio e deve essere opportunamente identificato, ogni qualvolta la distribuzione dei punti o il numero di punti cambia a causa della variazione della base di dati.

La metodologia dell'*adaptive kernel density estimation* realizza un modello geo-statistico idoneo a rappresentare al meglio i valori variabili di densità, utilmente integrabile con l'analisi delle forme di land-use per affinare il processo di analisi ed identificazione dei motivi.

Nel caso di studio esaminato il modello ha consentito di identificare con buona precisione diversi ambiti e di individuare nel cambiamento delle forme d'uso del suolo, innescate dall'incendio, possibili motivazioni che andrebbero approfondite.

SUMMARY

Geo-statistical analysis for pattern evaluation of fire ignition points in rural areas: the *adaptive kernel density estimation* approach and its implementation in the territory of the Gargano National Park

Fire managers need to study fire history in terms of frequency and spatial distribution in order to predict and realistically estimate fire risk. The exact location and the «spot» nature of the fire ignition points should be converted into continuous variables so that they could be integrated with other area data types. To better understand the gravity of the problem and its spatial frequency, the relative density should be an interpretable unit value (i.e. number of ignition points/ km²). In this paper we express the fire ignition points density as a continuous variable considering their space variability distribution by means of the *adaptive kernel interpolation* approach.

The study-case is an area of 1500 km² in the Gargano peninsula, due to its high frequency of fire occurrence. The relative density has been estimated considering 583 fire ignition points over a six years period (1997-2002). A calibration method is proposed in order to set up the geo-statistical parameters useful to create a continuous density surface where the local overestimation and underestimation is minimised.

The density map allows to analyse the fire problems in the Gargano National Park. The localisation of the hot spots points out some important considerations, useful for fire management and for fire assessment.

BIBLIOGRAFIA

- BAILEY T.C., GATRELL A.C., 1995 – *Interactive Spatial Data Analysis*. Longman Scientific & Technical, Burnt Mill, Essex, England.
- BOWMAN A.W., AZZALINI A., 1997 – *Applied Smoothing Techniques for Data Analysis: the Kernel Approach With S-Plus Illustrations*. Oxford University Press, Oxford.
- BREIMAN L., MEISEL W., PURCELL E., 1977 – *Variable kernel estimates of multivariate densities*. *Technometrics*, 19: 135-144.
- CACOULOS T., 1966 – *Estimation of a multivariate density*. *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*, 18(2): 179-189.
- CHUVIECO E., CONGALTON R., 1989 – *Application of remote sensing and geographic information systems to forest fire hazard mapping*. *Remote Sensing of Environment*, 29: 147-159.
- CRIMESTAT® V. 2.0 <http://www.icpsr.umich.edu/NACJD/crimestat.html>
- DE LA RIVA J., PÉREZ-CABELLO F., LANA-RENAULT N., KOUTSIAS N., 2004 – *Mapping forest fire occurrence at a regional scale*. *Remote Sensing and Environment*, 92: 363-369.
- FUKUNAGA K., 1990 – *Statistical Pattern Recognition*. Academic Press, San Diego.
- GATRELL A.C., BAILEY T.C., DIGGLE P.J., ROWLINGSONT B.S., 1996 – *Spatial point pattern analysis and its application in geographical epidemiology*. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 21: 256-274.
- KOUTSIAS N., KALABOKIDIS K.D., ALLGÖWER B., 2004 – *Fire occurrence patterns at landscape level: beyond positional accuracy of ignition points with kernel density estimation methods*. *Natural Resource Modelling*, 17/4, Winter 2004.
- LEONE V., LOVREGGIO R., 2003 – *Piano di Previsione, Prevenzione e Lotta Attiva contro gli Incendi Boschivi nel Parco Nazionale del Gargano*, rapporto inedito.
- LEONE V., LOVREGGIO R., FERNANDEZ J.M., 2002 – *Forest fires and anthropic influences: a study case (Gargano National Park, Italy)*. In: Viegas D.X. (Ed.) *Forest Fire Research & Wildland Fire Safety*, Millipress, Rotterdam.
- LEVINE N., 2002 – *CrimeStat II: A Spatial Statistics Program for the Analysis of Crime Incident Locations (version 2.0)*. Ned Levine and Associates Annandale, VA and The National Institute of Justice Washington, DC.
- MORGAN P., HARDY C.C., SWETNAM T.W., ROLLINS M.G., LONG D.G., 2001 – *Mapping fire regimes across time and scale: Understanding coarse and fine-scale fire patterns* *International Journal Wildland Fire*, 10: 329-342.
- PARZEN E., 1962 – *On estimation of a probability density function and mode*. *Annals Mathematical Statistics*, 33: 1065-1076.
- REGIONE PUGLIA, 1996 – *Piano Regionale di Difesa contro gli Incendi*. *Bollettino Ufficiale Regione Puglia*, 85: 4-626.
- ROSENBLATT M., 1956 – *Remarks on some nonparametric estimates of a density function*. *Annals Mathematical Statistics*, 27: 832-837.
- VAN KERM P., 2003 – *Adaptive kernel density estimation*. *Stata Journal* 3 (2): 148-156.

