

LA SINERGIA DI STRUMENTI FRA STRUMENTI DI INTELLIGENZA ARTIFICIALE E
PROCEDURE DI AIUTO ALLE DECISIONI MULTICRITERI PER LA VALUTAZIONE
DEL RISCHIO

Alessandra LAPUCCI¹, Massimiliano PETRI¹

¹ Università di Pisa, Dipartimento di Ingegneria Civile via Diotisalvi 2, 56122, Pisa

SOMMARIO

L'obiettivo del presente lavoro è quello di costruire un sistema di supporto alle decisioni per la valutazione territoriale integrata del rischio ed in particolare di quello derivante da incendi boschivi. La sperimentazione si basa sulla sinergia di tecniche di data mining, capaci di estrarre regole decisionali sulla base di ampi database di tipo geografico, procedure di aiuto alle decisioni multicriteri e strumenti GIS .

In generale la valutazione del rischio è basata sull'analisi di due aspetti fra loro complementari: la determinazione della probabilità che l'evento calamitoso (l'incendio) si verifichi e la stima degli effetti che l'evento provoca sul territorio considerato.

Nella presente ricerca la pericolosità di un incendio boschivo viene determinata tramite strumenti di intelligenza artificiale (alberi decisionali) che consentono di classificare il territorio dell'area di studio in funzione del grado di probabilità di innesco del fenomeno incendiario. Parallelamente il danno provocato dalla propagazione del fuoco viene stimato tramite la tecnica di analisi multiattributo spaziale ed in particolare viene applicata la tecnica dell'analisi gerarchica di Saaty.

La costruzione di un indice di rischio e la sua distribuzione spaziale nel territorio dell'area di studio (zona del tufo in provincia di Grosseto) viene determinata integrando la mappa della pericolosità con quella del danno proponendo scenari alternativi di rischio con l'obiettivo di supportare i decisori nelle scelte di tutela e protezione del territorio.

1 INTRODUZIONE

La regione Mediterranea è particolarmente colpita dagli *incendi boschivi* ed infatti ogni anno più di 50 mila incendi bruciano in media 600/800 mila ettari di bosco pari ad un' area grande quanto l'isola di Creta o la Corsica e corrispondente al 1,3 – 1,7 % delle foreste mediterranee. I paesi membri dell'UE che si affacciano sul Mediterraneo (Spagna, Portogallo, Italia e Grecia) sono stati quelli più colpiti: dagli anni '60 la media del totale della superficie bruciata in questi paesi si è quadruplicata. L'analisi dei dati relativi alle *cause degli incendi* avvenuti nel corso del 2005 (fonte Protezione Civile) in Italia mostra una percentuale quasi insignificante di incendi dipendenti da cause accidentali e naturali (rispettivamente lo 0,5 e l'1,1%), mentre salgono significativamente i casi legati a cause colpose e cioè imprudenza e violazione di norme (34,8%) e spiccano quelli causati deliberatamente per cagionare un danno (59,8%). Gli incendi dolosi, causati per recare un danno effettivo all'ambiente, sono motivati essenzialmente dal tentativo di ottenere nuovi terreni per il pascolo (25,3%), per l'agricoltura, per speculazione edilizia, per creare posti di lavoro connessi alle attività di spegnimento e per questioni di "bracconaggio". Questi avvengono nelle aree dove il bosco non ha altra funzione economica se non quella puramente ricreazionale e diminuiscono gradatamente nelle zone dove il bosco è inserito in ambiti di pregio come parchi e aree protette che valorizzano il contesto territoriale. Certamente i fattori climatici e l'andamento stagionale hanno una notevole influenza ma gli incendi dei boschi tuttavia, pur seguendo l'andamento climatico, non si manifestano uniformemente sul territorio: ci sono delle zone dove questo pericolo è maggiore che in altre, come l'esperienza ed i fatti annualmente confermano. A parità di condizioni climatiche e di coefficiente d'aridità, vi sono infatti altre situazioni che favoriscono lo sviluppo degli incendi boschivi quali l'afflusso turistico, l'abbandono delle campagne, l'attività di particolari pratiche agronomiche e pastorizie, le speculazioni economiche, la vicinanza alle strade ecc. In base all'andamento meteorologico e climatico due sono i *periodi di massimo rischio incendi*: uno è quello *estivo* (mesi di luglio, agosto, settembre) che risulta più critico nelle regioni del centro-sud fra cui la *Toscana*; l'altro è quello *invernale* (mesi di gennaio, febbraio e marzo) che invece interessa maggiormente le regioni dell'arco alpino. La somma dei valori per i due periodi fornisce un valore che consente una classificazione del rischio incendi boschivi su scala comunale (Figura 1a). Come si può notare la maggior parte del territorio della *Provincia di Grosseto* risulta essere a rischio massimo e la rimanente parte a rischio elevato. Questo tipo di zonizzazione tuttavia, oltre ad essere su base comunale, risulta molto grossolana e poco utile per poter predisporre in modo adeguato piani di prevenzione, di spegnimento e misure di intervento antincendio e soccorso della popolazione. È perciò necessario individuare, localizzare e valutare, attraverso un metodo scientifico rigoroso e ad un livello molto maggiore di dettaglio, le porzioni di territorio che sono più a

rischio riguardo al fenomeno degli incendi boschivi. È utile ricordare che, quando viene analizzata la tematica del *rischio incendi in ambiente extraurbano* si parla generalmente di “rischio incendi *boschivi*”, in quanto viene posta una particolare attenzione alla protezione e salvaguardia delle aree ricoperte dai boschi che risultano quelle in prevalenza danneggiate dal passaggio delle fiamme. In realtà *nel presente studio*, tanto l’analisi della pericolosità che la stima del danno, vengono effettuate *su tutto il territorio* dell’area del tufo *ad eccezione delle zone urbanizzate*, quindi il rischio viene computato *non solo* nelle zone dove ci sono *i boschi*, ma anche in tutte le altre aree, caratterizzate dalla presenza di colture e di vegetazione. Per tali motivi, più che di rischio incendi “boschivi” è più corretto parlare di “*rischio da incendi in zone naturali e seminaturali*”.

Data la complessità del fenomeno e la molteplicità di variabili geografiche e socio economiche necessarie per un’indagine approfondita a livello provinciale, la *sperimentazione* oggetto del presente lavoro è stata condotta su un’*area prototipale omogenea* denominata “Area del Tufo” (Figura 1b) i cui comuni (*Castell’Azzara, Pitigliano e Sorano*) hanno caratteristiche territoriali e funzionali molto simili, tanto che hanno adottato un *Piano Strutturale integrato comune* che definisce gli obiettivi strategici di sviluppo sostenibile a livello di area vasta. L’*obiettivo* del presente lavoro è quello di operare, nell’area di studio relativa ai comuni dell’Area del Tufo, una valutazione del *rischio incendi*, mediante un sistema in grado di tener conto della pericolosità del fenomeno, cioè della probabilità che l’incendio si verifichi, e del danno che l’evento stesso (cioè la propagazione del fuoco) può provocare.

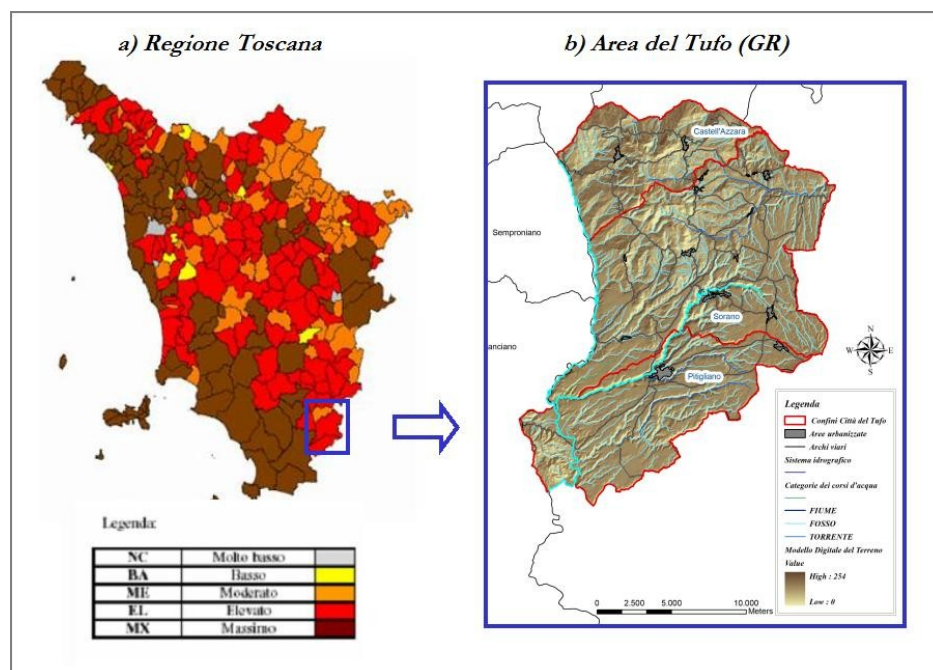


Figura 1 a) Mappatura del rischio incendi boschivi nei Comuni della Regione Toscana (Fonte: Regione Toscana), b) Area di studio considerata per la valutazione integrata del rischio incendi boschivi (Comuni di Castell’Azzara, Pitigliano e Sorano, Provincia di GR)

A tal scopo viene implementato un *modello di valutazione integrata* del rischio basato sulla sinergia fra strumenti di *intelligenza artificiale* e tecniche di *analisi a criteri multipli spaziale*.

2 L'ANALISI DEL RISCHIO

La valutazione del rischio di incendi è una questione di notevole rilevanza sia a livello di pianificazione territoriale, con l'obiettivo di prevedere possibili scenari connessi al verificarsi dell'evento calamitoso ed individuare le aree a maggior rischio, sia a livello esecutivo per redigere piani operativi di prevenzione ed ottimizzare i sistemi di protezione della popolazione e dei beni presenti nel territorio interessato dall'incendio.

Il *rischio* è un concetto complesso (Grandell 1991) che associa due elementi fondamentali: il primo è la *probabilità* che un determinato evento sfavorevole (l'incendio) si verifichi, quindi la *pericolosità* del fenomeno, l'altro è la *conseguenza* che l'evento comporta sul territorio in esame, cioè il *danno* da esso provocato.

Quando si parla di rischio ambientale, e nello specifico di rischio incendi (Simonetti 2002), si fa riferimento alla seguente espressione nota come *equazione del rischio* (definizione UNESCO):

$$R = P \times V \times E = P \times D$$

dove:

- *P* è la *pericolosità*, ovvero la probabilità che l'incendio possa innescarsi in una data area ed in un determinato periodo di osservazione temporale;
- *V* rappresenta la *vulnerabilità territoriale*, cioè l'attitudine a subire un danno in conseguenza del verificarsi dell'evento calamitoso; questa ultima si esprime generalmente mediante un coefficiente compreso tra zero (assenza di danno) ed uno, (perdita totale). Conseguentemente le porzioni di territorio ove l'incendio può arrecare danni alle persone ed a beni sono dette aree vulnerabili;
- *E* indica l'*esposizione al rischio* ed include la popolazione residente nel territorio considerato, la presenza di proprietà pubbliche e private, di attività economiche, di servizi (scuole, ospedali, infrastrutture etc);
- *D* è il *danno atteso* che deriva dal prodotto dell'esposizione del bene per la sua vulnerabilità e può essere espresso in termini monetari e/o in numero di unità esposte.

Per poter correttamente localizzare e valutare le aree a rischio incendi nell'Area del Tufo della Provincia di Grosseto risulta necessario quantificare e rappresentare, attraverso la costruzione di mappe tematiche, sia il grado di pericolosità che il livello di danno per ciascuna porzione elementare (cella quadrata di lato 10 mt) di territorio in cui l'area di studio (viene suddivisa. La classificazione del territorio dell'Area del Tufo nella Provincia di Grosseto in funzione del rischio incendi, definito come combinazione di pericolosità e danno secondo l'equazione sopra riportata, richiede quindi metodi di analisi dei dati e tecniche valutative capaci considerare una pluralità di elementi di rischio (Amparo Alonso-Betanzos 2003,

Cheikh Mbow 2004), Colin 2004) fra loro molto diversi quali ad esempio: 1) *fattori di tipo geografico*, quali la morfologia del territorio, l'esposizione, l'acclività etc; 2) *fattori meteorologici* come la temperatura, la piovosità, l'intensità e la direzione dei venti dominanti, l'umidità del terreno etc; 3) fattori connessi allo *stato di antropizzazione del territorio* quali la densità di popolazione, il flusso turistico, la presenza di infrastrutture e di reti tecnologiche, le tipologie di uso e consumo del suolo etc; 4) *fattori di tipo ambientale* come la presenza di aree vincolate di pregio o di aree ad alto valore paesaggistico etc; 5) *fattori di tipo socio-economico* come il valore dei beni esposti.

La quantità di variabili territoriali adottate per la stima del rischio dipende ovviamente dalla *disponibilità, qualità e livello di dettaglio dei dati di base disponibili* per lo studio. La valutazione complessiva del rischio incendi sarà quindi possibile integrando opportunamente la *mappa della pericolosità*, elaborata tramite gli strumenti di *intelligenza artificiale*, con quella del *danno* prodotta attraverso l'*analisi multicriteri spaziale*.

3 LA STIMA DELLA PERICOLOSITÀ

3.1 Il modello classificatore

Per la costruzione della *mappa di pericolosità* di un incendio boschivo viene adottata una tecnica induttiva che, a partire dalle *variabili considerate influenti nella probabilità di innesco* di un incendio e dai *dati target* relativi alle aree incendiate negli ultimi anni (2006-2008) costruisce un *classificatore* capace di *prevedere* anche per le aree che non sono mai state incendiate la probabilità che su di esse si inneschi un incendio.

La tecnica adoperata (Han et Kamber 2000) deriva dal campo del *Machine Learning* ed in particolare dell'*Intelligenza Artificiale* e precisamente si chiama *Alberi Decisionali (Decision Trees)*.

Questa tecnica richiede delle variabili indipendenti di input (nel nostro caso indicate in Tabella 1) e una variabile target che sarà la variabile oggetto di classificazione e quindi di previsione. Nel nostro caso in Tabella 1 sono indicate le variabili indipendenti mentre la variabile target è la presenza/assenza di incendi in ciascuna zona.

Le *tecniche di Intelligenza Artificiale* vengono impiegate per studi previstivi poiché derivano dall'analisi cognitiva dei sistemi complessi e delle strutture neurali della mente umana (basta pensare, per esempio, alle Reti Neurali, adoperate per ricostruire i comportamenti umani nei Robots) e quindi permettono di "captare" sia fenomeni di *innesco di incendi per motivi naturali* (per esempio la presenza di strade principali e di aree urbanizzate) sia ricostruire regole che riflettono le *mappe mentali di eventuali piromani* nel caso di *incendi dolosi* (per esempio distanza da centri urbani o strade di grande traffico, presenza di terreno

facilmente coltivabili per pendenza e altri fattori). La caratteristica più interessante di questa metodologia è la sua capacità di *poter utilizzare una grande quantità di dati* e di variabili anche *apparentemente non correlate*, aspetto importante nell'attuale società informatizzata che fornisce una notevole quantità di dati, georeferenziati e non, derivanti da diversi campi di studio. Gli Alberi Decisionali permettono di creare dei *links logici* sotto forma di *regole* del tipo *IF (valori variabili di input) THEN (valore variabile target)*.

La tecnica degli Alberi Decisionali analizza le diverse variabili che compongono il training dataset con uno schema top-down di tipo ricorsivo; la ricerca dell'ottimo globale (che non è detto venga raggiunto) avviene applicando la ripartizione del dataset che massimizza, ad ogni singolo passo locale, una certa funzione/formula matematica.

Tabella 1 Variabili indipendenti esplicative della pericolosità di innesco incendi

Nome dato	Descrizione	Scala	Incidenza del dato nello studio della pericolosità
DTM	Raster relativo al modello digitale del terreno	Risoluzione di 10 metri	Rappresenta la morfologia del territorio
Esposizione	Raster relativo all'esposizione dei versanti	Risoluzione di 10 metri	Rappresenta l'esposizione al sole del territorio
Acclività	Raster relativo alla pendenza dei versanti	Risoluzione di 10 metri	Influenza principalmente la possibilità di diffusione di un incendio
Uso del suolo	Dato poligonale relativo all'uso del suolo	10.000 + 100.000	Caratterizza la possibilità di innesco di un incendio (presenza di boschi e altro)
Strade	Raster relativo alla distanza dalla più vicina infrastruttura viaria	Risoluzione di 10 metri	Caratterizza la possibilità di innesco di un incendio (variabile con la distanza dalla strada)
Reti tecnologiche	Raster relativo alla distanza dalla più vicina rete tecnologica	Risoluzione di 10 metri	Caratterizza la possibilità di innesco di un incendio (variabile con la distanza dalle reti)
Elementi influenti	Dato vettoriale relativo a tutti gli elementi territoriali che possono aumentare la probabilità di innesco di un incendio	10.000	Sono gli elementi che aumentano la possibilità di innesco di un incendio, per presenza umana o per presenza di materiale infiammabile (per esempio: Centrale Elettrica/ Cabina Elettrica, Monumento, Capannone Vivaistico, Campeggio, Discarica e altro)
Zone Tutelate	Usi del suolo soggetti a vincolo	10.000	Possono attivare un nuovo incendio

3.2 Le fasi metodologiche per la costruzione della mappa di pericolosità

In Figura 2 è riportato un *flow chart di sintesi della metodologia adottata* per la costruzione della *mappa di pericolosità*. A partire dai dati cartografici di base, inseriti all'interno di un S.I.T. vengono effettuate operazioni cartografiche e di Geoprocessing spaziale che restituiscono un report tabellare contenente, per ogni parte del territorio (ovvero per ogni riga del DataBase), le informazioni di tutte le variabili già territoriali adottate per lo studio. Tale report tabellare costituisce il dato di input all'Albero Decisionale che estrae le regole decisionali. Il modello classificatore (decision tree) integrato in un GIS applica le regole decisionali a tutto il territorio consentendo la costruzione della mappa di pericolosità di un incendio boschivo sul territorio dell'area di studio. Quest'ultimo viene scomposto in celle quadrate di 10 m in modo da considerare la presenza di elementi particolari e/o puntuali come l'urbanizzato discontinuo o un'area stradale.

Per ogni cella quadrata del territorio è stato agganciato il contenuto informativo relativo a tutte le variabili suddette in modo da ricostruire una griglia vettoriale poligonale che copre l'intero territorio (Figura 3).

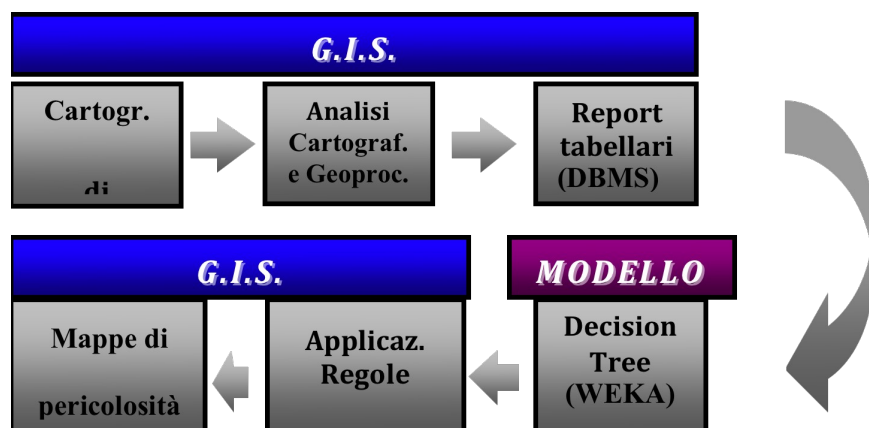


Figura 2 Le fasi metodologiche per costruire la mappa della pericolosità

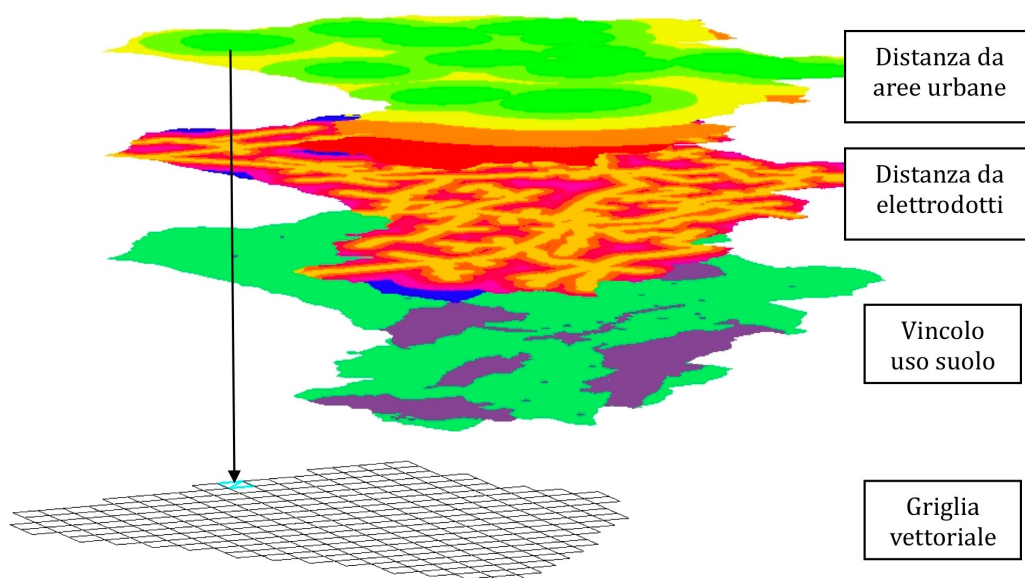


Figura 3 Conversione dei dati dal formato raster alla costruzione di una griglia vettoriale

Data la bassa percentuale di metri quadri incendiati nell'area di studio rispetto all'intera area stessa (su un area totale di circa 34130 ettari, le zone statisticamente incendiate almeno una volta sono circa 37 ettari) per evitare di costruire molte regole relative alla probabilità di non innesco di un incendio, è stata adottata una griglia vettoriale non omogenea sul territorio, in modo da mettere il focus dell'indagine sulle aree incendiate senza trascurare tutte le altre zone che non sono mai state sede percorse dal fuoco. In particolare abbiamo costruito una prima griglia vettoriale continua, costituita da 3768 celle che copre interamente le aree incendiate (Figura 4a) mentre per il territorio restante, dove non sono avvenuti gli incendi, sono state

7000 celle (Figura 4b) mediante un campionamento casuale sulle aree non incendiate: questa procedura ha permesso di avere una rappresentatività delle caratteristiche di tutta l'area in esame ed una maggiore proporzione fra aree statisticamente incendiate e non.

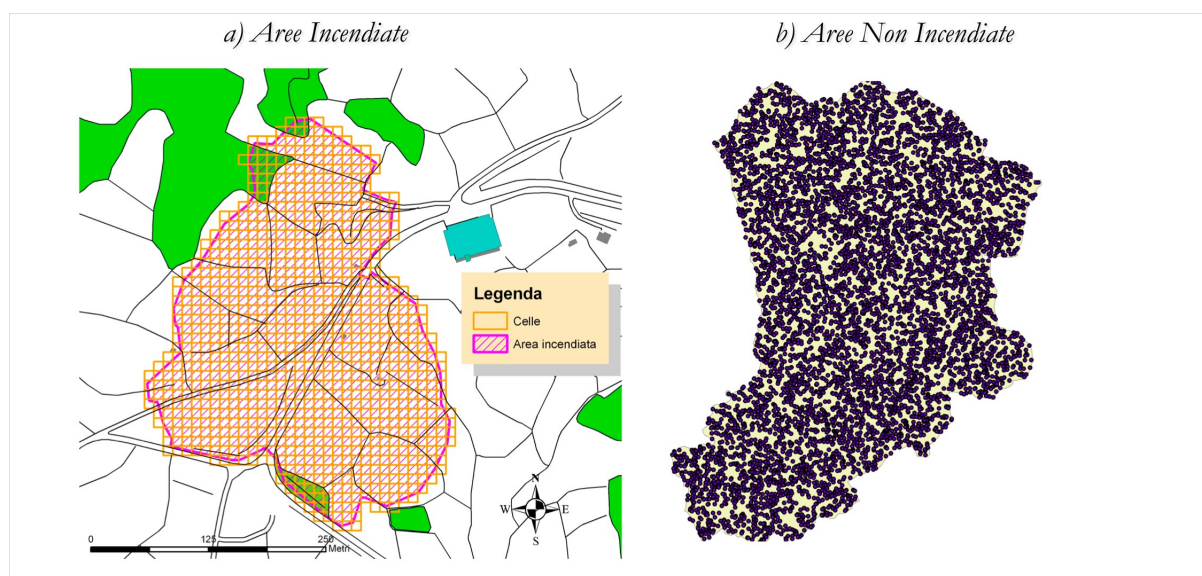


Figura 4 a) Costruzione della griglia continua sopra le aree incendiate, b) I risultati del campionamento casuale nelle aree non incendiate

3.3 I risultati dell'analisi di pericolosità

L'analisi di pericolosità viene condotta costruendo attraverso strumenti di intelligenza artificiale ed in particolare i decision trees: l'implementazione del modello classificatore viene effettuata attraverso software Weka i cui risultati sono ben interfacciabili con l'ambiente GIS. Attraverso una fase iniziale di Exploratory Data Analysis, necessaria per capire le correlazioni fra i dati e le quantità in gioco, si evidenzia che gli usi del suolo corrispondenti al bosco ed alla destinazione prato/pascolo hanno una maggiore frequenza di incendi per l'area dei studio considerata. Si evince inoltre che l'innescò di incendi, negli ultimi anni, abbia completamente riguardato zone non coperte da vincoli di tutela del suolo e quasi sempre vicine ai sentieri, adottati probabilmente come via di accesso/fuga.

L'Albero decisionale costruito è composto da 184 foglie classificatorie, ovvero da 184 diverse regole di classificazione del territorio in celle incendiate o meno. Dal punto di vista numerico i risultati del modello sono molto positivi perché la percentuale di accuratezza della classificazione è pari al 98,75%, ovvero le regole estratte su un campione di 10674 celle e successivamente applicate a tutte le restanti (fase di validazione) producono una classificazione corretta quasi nel 99% dei casi.

In Tabella 2 vengono riportate le regole decisionali aventi un “supporto” elevato, cioè quelle applicabili su un numero molto elevato di porzioni (celle) dell’area del tufo. Le regole più frequenti estratte attraverso il modello evidenziano come la probabilità di innesco di un incendio sia maggiore nelle zone più distanti dalle strade sia principali che secondarie (non asfaltate), mentre diminuisce con la distanza dai sentieri: probabilmente chi decide volontariamente di incendiare un’area non vuole la vicinanza di possibili osservatori. Un altro fattore significativo sulla pericolosità di un incendio è la bassa distanza dai centri urbani o da complessi edilizi extraurbani (scuole, ospedali, complessi sportivi etc): gli incendi boschivi hanno infatti origine in zone dove il livello di antropizzazione del territorio è abbastanza alto. Gli usi del suolo più probabili per l’innesco di un incendio sono in primo luogo le aree boscate, poi quelle destinate a pascolo ed a seminativo non irriguo, mentre alcune variabili territoriali come l’esposizione o la pendenza dei versanti non risultano influire in modo rilevante.

Tabella 2 Le principali regole decisionali estratte dal modello classificatore

Condizione IF	Classificazione THEN (1=incendio)	SUPPORTO (Errori)
DSSTRNOASF = 4 AND DS_COMPLES = 1 AND USO_SUOLO = 3 AND PENDENZA = 3	1	413 (0)
DSSTRNOASF = 3 AND DS_VIAB_PR = 1 AND DSCENTR_EL = 2 AND QUOTA = 2 AND PENDENZA = 3 AND USO_SUOLO = 6 AND ESPOSIZ = W	1	397 (2)
DSSTRNOASF = 3 AND DS_VIAB_PR = 1 AND DSCENTR_EL = 2 AND QUOTA = 2 AND USO_SUOLO = 2	1	236 (0)
DSSTRNOASF = 3 AND DS_VIAB_PR = 1 AND DSCENTR_EL = 2 AND QUOTA = 2 AND PENDENZA = 3 AND ESPOSIZ = W	1	162 (1)
USO_SUOLO = 5 AND DIST_SENT = 1 AND PENDENZA = 2 AND ESPOSIZ = E	1	75 (9)
DSSTRNOASF = 4 AND DS_COMPLES = 1 AND USO_SUOLO = 3 AND ESPOSIZ = W	1	108 (2)
DSSTRNOASF = 3 AND DS_VIAB_PR = 1 AND DSCENTR_EL = 2 AND QUOTA = 3 AND DS_COMPLES = 2 AND USO_SUOLO = 2	1	182 (0)
DSSTRNOASF = 3 AND DS_VIAB_PR = 1 AND DSCENTR_EL = 2 AND USO_SUOLO = 3 AND QUOTA = 2	1	114 (0)
Condizione IF	Classificazione THEN (1=incendio)	SUPPORTO (Errori)
QUOTA = 1 AND DIST_SENT = 1	0	1036 (0)
DSSTRNOASF = 3 AND DS_VIAB_PR = 1 AND QUOTA = 3 AND USO_SUOLO = 3 AND DSCENTR_EL = 3	1	92 (0)
QUOTA = 2 AND DSSTRNOASF = 1 AND DIST_SENT = 1	0	1998 (0)
DS_COMPLES = 2 AND DSSTRNOASF = 1 AND DIST_SENT = 1	0	776 (0)

In Figura 5 viene rappresentato un estratto dell'Albero Decisionale relativo al caso di studio in esame, mentre in Figura 6 si riporta la Mappa della Pericolosità finale.

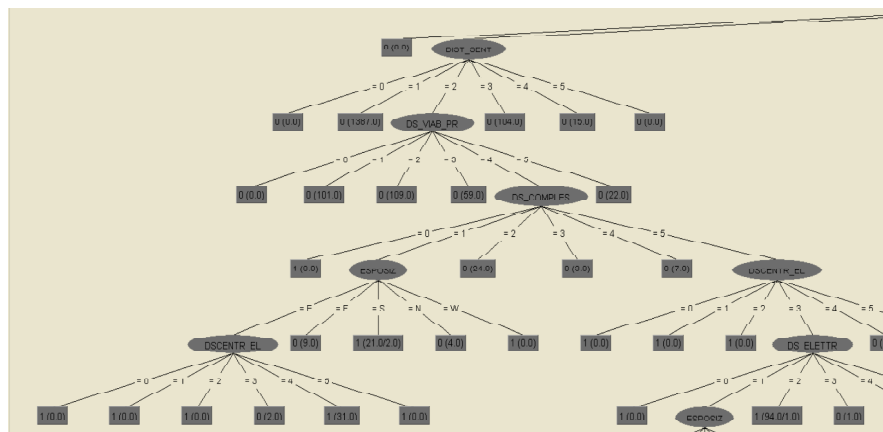


Figura 5 Una sezione dell'albero decisionale implementato attraverso il software weka

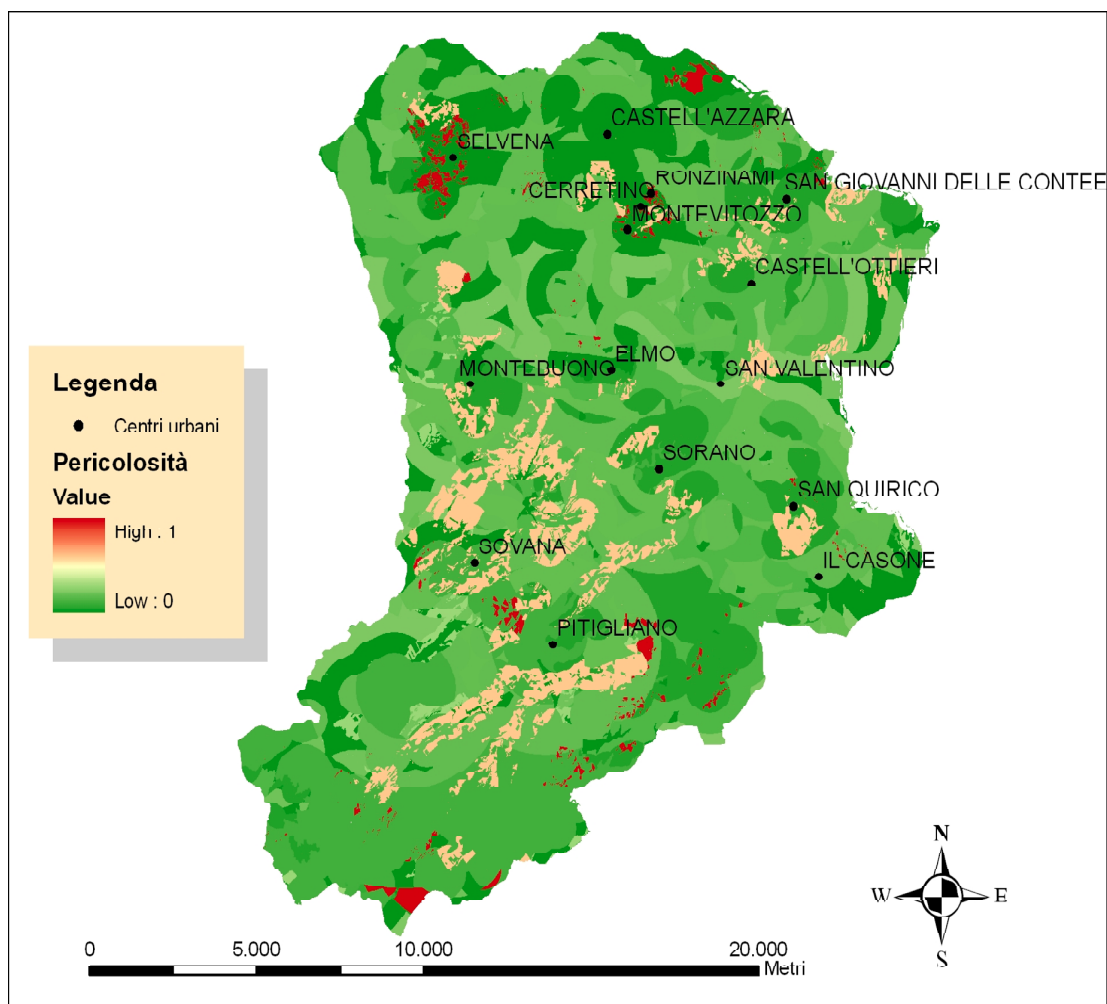


Figura 6 Una sezione dell'albero decisionale implementato attraverso il software weka

La mappa di Figura 6 evidenzia alcune zone a maggiore pericolosità all'interno di un territorio generalmente a basso-media pericolosità. Le aree più "pericolose" si trovano a sud dell'abitato di Pitigliano e nello stesso comune sono presenti zone puntuali di criticità che si diffondono su una fascia di media pericolosità. Nella zona centrale dell'area del tufo la pericolosità assume valori elevati solo a nord-ovest di Pitigliano, mentre si trovano concentrate nella zona occidentale diffuse aree a pericolosità media. Infine nella parte settentrionale dell'area di studio, la maggior pericolosità si localizza intorno a Selvena e a nord-est di Castell'Azzara (aree statisticamente sede di fenomeni incendiari) così come intorno ai paesi di Cerretano e Montevitozzo.

4 LA STIMA DEL DANNO

La valutazione del *danno atteso*, dovuto alla propagazione di un *incendio boschivo*, deve tener conto della perdita, in molti casi irreversibile, sia di elementi territoriali ad elevato valore monetario (colture pregiate, reti tecnologiche etc), sia di tutte quelle risorse ad alto pregio ambientale (paesaggi locali, zone di protezione speciali, oasi faunistiche, siti storico-archeologici etc.) che verrebbero irreversibilmente compromesse dal propagarsi del fuoco. È quindi necessario stimare l'entità del danno provocato da un incendio boschivo attraverso procedure capaci di integrare, in un'unica metodologia valutativa, sia *fattori commensurabili che incommensurabili* e di comprendere la *natura fortemente soggettiva* della stima da effettuare, dato che ciascuno dei fattori di analisi può essere considerato più o meno importante nella determinazione del risultato finale (danno da incendio).

Per questo motivo la valutazione del danno da incendio viene effettuata attraverso *tecniche di aiuto alle decisioni multicriteri* (Voogd 1983, Vincke 1992) che sono procedure valutative di tipo *non monetario* adottate per individuare ex ante, in funzione di *più criteri di riferimento*, quali porzioni dell' Area del Tufo della Provincia di Grosseto sarebbero maggiormente colpite dalla propagazione di un incendio, quindi quali aree sono più danneggiabili da un evento di questo tipo.

A differenza dell'Analisi Costi Benefici (ACB) che riconduce tutti i criteri di valutazione all'unità di misura monetaria, con evidenti difficoltà soprattutto nella stima delle cosiddette "esternalità negative" difficilmente monetizzabili (es: perdita di valore di un paesaggio, riduzione delle biodiversità, variazione dell'assetto di colture tipiche etc), *l'analisi multicriteri (AMC)* consente di effettuare la stima (in questo caso del danno) sulla base di più criteri di riferimento (es: economia, ambiente, biodiversità, protezione dei paesaggi tipici etc). senza ricondurre il tutto all'unità di misura economica, ma *lasciando invariate le "unità di misura"* di tutti i fattori di analisi (in questo caso del danno), quindi effettuando una *omogeneizzazione delle scale* ed una successiva *integrazione* di tutti gli strati informativi

adottati per l'indagine che vengono *pesati* secondo le priorità dichiarate dai decisori coinvolti nel processo.

4.1 *L'analisi multicriteri spaziale ed il metodo AHP*

La valutazione del danno e l'individuazione sul territorio delle aree più esposte ed essere danneggiate da un incendio viene effettuata attraverso *tecniche di analisi a criteri multipli di tipo spaziale* dove risulta rilevante il supporto dei Geographical Information Systems (GIS).

Nel presente lavoro il GIS è indispensabile per analizzare la grande varietà di dati geografici necessari per la valutazione del danno da incendio, mentre le metodologie multicriteri (ed in particolare la tecnica AHP) servono a quantificare i pesi che rappresentano l'importanza relativa degli stessi criteri e degli attributi adottati per la stima.

In generale, quindi, l'intera procedura di analisi a criteri multipli spaziale può essere pensata come un processo che combina e trasforma i dati geografici di input (le mappe dei criteri e degli attributi di valutazione adottati per l'analisi del danno) in un output, anch'esso geografico, rappresentato dalla mappa del danno complessivo in cui vengono localizzate le zone di maggiore criticità (Malczewski 1999, Jankowsky 1995).

La *mappa del danno* costituisce un *supporto al processo decisionale* ed è finalizzata ad aiutare i decision makers nell'intraprendere scelte più efficaci ed efficienti in materia di pianificazione del territorio.

Fra le diverse tecniche presenti in letteratura, viene applicato il *Metodo di Saaty*, conosciuto come *AHP* (Analytic Hierarchy Process) perché risulta particolarmente efficace per la misurazione del danno su un così elevato numero di alternative decisionali che, per il caso di studio esaminato, sono rappresentate dalle celle quadrate di una griglia di lato 10 mt che ricopre l'intera Area del Tufo della Provincia di Grosseto. Tale metodo, sviluppata da Saaty a partire dagli anni ottanta (Saaty 1980a, 1980b, 1988, Vargas 1990), si articola in tre fasi: decomposizione, confronti a coppie e ricomposizione gerarchica.

La fase di *decomposizione* consiste nel definire una struttura gerarchica che comprende i più importanti elementi del problema decisionale: un livello iniziale costituito dall'obiettivo generale della valutazione (*goal*), un livello finale che rappresenta generalmente le *alternative* da ordinare ed una serie di livelli intermedi che rappresentano i *criteri e gli attributi* necessari per la valutazione, in questo caso per l'analisi del danno da incendi. In un problema di analisi spaziale, tuttavia, la gerarchia è costituita, generalmente, solo da tre livelli e comunque termina al livello degli attributi (Siddiqui 1996) in quanto *le alternative sono geograficamente localizzate e rappresentate, su ciascuna mappa degli attributi, da celle quadrate di una griglia vettoriale che ricopre l'area di studio.*

Definito l'albero gerarchico, si effettuano i *confronti a coppie* tra gli elementi della gerarchia al fine di stabilire *quale sia il più importante ed in quale misura*. I risultati di tali confronti

sono detti coefficienti di dominanza e costituiscono gli elementi di una matrice, detta appunto matrice dei confronti a coppie. Quando non sia possibile determinare in modo quantitativo i coefficienti di dominanza, Saaty propone una *scala semantica* che permette di esprimere le preferenze in forma numerica, associando i primi nove numeri interi ad altrettanti giudizi di importanza (1 significa ugualmente importante, mentre 9 estremamente più importante). I coefficienti di dominanza determinati secondo la scala semantica di Saaty costituiscono gli elementi di ogni matrice dei confronti a coppie. Per ogni matrice dei confronti (il loro numero dipende dalla struttura dell'albero gerarchico) si calcola un vettore di ordinamento i cui elementi sono i *pesi locali* degli elementi di un livello rispetto all'elemento del livello superiore da cui essi dipendono. Il vettore di ordinamento è l'autovettore dominante della matrice dei confronti a coppie, ovvero i pesi locali coincidono con le componenti dell'autovettore principale corrispondente.

A causa dell'inevitabile incongruenza di giudizi, dovuta al fatto che gli elementi della gerarchia appartenenti allo stesso livello vengono confrontati due a due, spesso la matrice dei confronti a coppie non è consistente, cioè esistono delle contraddizioni nell'identificazione del grado di importanza degli elementi considerati rispetto all'elemento del livello superiore da cui dipendono. Per questo motivo viene calcolato un *indice di consistenza CR* (consistency ratio) tale che, se supera la soglia convenzionale del 10%, comporta la riformulazione dei giudizi ed una nuova compilazione della matrice dei confronti a coppie.

La *fase di ricomposizione*, infine, consiste nel determinare i pesi globali del livello finale della gerarchia rispetto al goal, applicando il principio di composizione gerarchica che consiste nel moltiplicare i pesi locali di ogni elemento per quelli dei corrispondenti elementi sovraordinati e sommare i prodotti così ottenuti.

Nei problemi di analisi multicriteri spaziale, come nel caso del danno da incendi, la fase di ricomposizione gerarchica consiste nell'effettuare dapprima le somme pesate delle mappe degli attributi ottenendo così le mappe dei criteri, quindi nel fare le somme pesate delle mappe dei criteri ottenendo così la mappa del goal: in pratica si risale l'albero gerarchico dalle foglie fino alla sommità. Dato che ciascuna delle suddette mappe è in formato raster, la procedura di ricomposizione gerarchica è gestita tramite le funzioni di *Map Algebra* (Tomlin, 1990) tipiche dell'ambiente di lavoro GIS.

La *struttura gerarchica* relativa al *presente caso* di studi viene riportata in Figura 7: il *goal* è rappresentato dal danno connesso agli incendi in zone naturali e seminaturali, i *criteri* individuano le due macrocategorie di danno sul territorio (danno economico-antropico e danno ambientale), gli *attributi* identificano gli strati informativi necessari per descrivere i criteri, mentre i *dati di base* sono gli strati informativi di base che popolano il Sistema Informativo Territoriale (SIT) costruito ad hoc per il presente caso di studio.

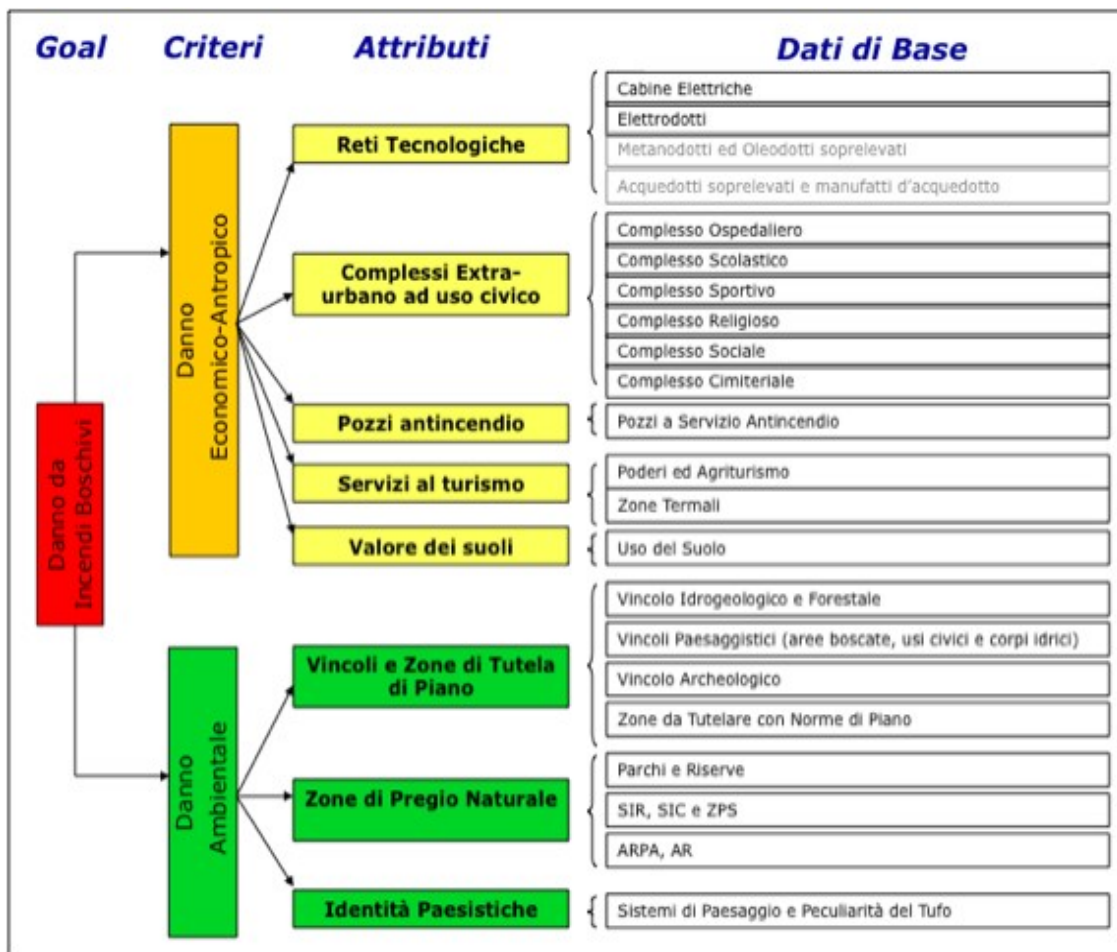


Figura 7 Struttura gerarchica di Saaty riferita al caso del rischio incendi – identificazione dei livelli della gerarchia (goal, criteri, attributi) e dei relativi dati di base

4.2 Le fasi metodologiche per la costruzione della mappa del danno

Lo schema generale delle fasi necessarie per quantificare e rappresentare, attraverso mappe georeferenziate, le zone dell'Area del Tufo più danneggiabili in caso di incendio è riportato in Figura 8 e le fasi metodologiche rappresentate nel flow-chart vengono descritte di seguito:

- Acquisizione Dati di Base: sulla base della struttura gerarchica di Saaty identificata per il danno da incendi (figura 3.4) vengono *selezionati gli strati* informativi necessari per lo studio del danno economico-antropico e del danno ambientale che popolano il SIT costruito ad hoc per il presente lavoro;
- Processing: i dati grezzi vengono elaborati in ambiente GIS al fine di costruire delle mappe in cui l'informazione necessaria per lo studio del danno possa essere "spalmata" sull'intero territorio dell'area del tufo. Dato che, nel problema in esame, le alternative territoriali su cui stimare il danno sono rappresentate dalle maglie di una griglia quadrata di lato 10 mt, è necessario *riferire l'informazione presente nei dati di*

base a tutti i pixel che ricoprono l'area di studio. Le elaborazioni effettuate in questa fase variano da caso a caso, ma riguardano in generale calcoli di distanze e di densità, analisi di overlay spaziale e di riclassificazione di attributi alfanumerici presenti nelle informazioni di base: La natura dell'elaborazione dipende anche dalla primitiva geometrica del dato di base (puntuale, lineare, poligonale) e dalla qualità degli attributi presenti nella componente tabellare del dato.

- Standardizzazione: le mappe derivanti dalla fase di processing vengono standardizzate al fine di *omogeneizzare le scale di valutazione*. Infatti i dati relativi a distanze, densità, presenza di vincoli, classi di paesaggio, tipologie di uso del suolo etc presentano unità di misura fra loro incommensurabili, oltre al fatto che alcuni dati sono di tipo discreto (categorici), mentre altri sono di tipo continuo (numerici). Pertanto la fase di standardizzazione consente di portare tutte le unità di misura ad una *comune scala adimensionale compresa nell'intervallo 0-1* dove, per convenzione, valori prossimi a 0 indicano un danno lieve, mentre valori vicini ad 1 indicano un danno massimo. Questa riclassificazione dei valori dei dati di partenza in valori di indice di danno standardizzati viene effettuata costruendo, per ognuno di essi, una adeguata *funzione di utilità* in cui sull'asse delle ascisse si riportano i valori del dato non standardizzato (categorici o numerici), mentre sull'asse delle ordinate sono riportati i valori dell'indice di danno compresi fra 0 ed 1 secondo la convenzione precedentemente adottata. Conseguentemente, mentre per i dati numerici (es: distanze e densità) la funzione di utilità è anche essa di tipo continuo con andamento lineare monotono o lineare a tratti, per i dati categorici (es: uso del suolo, classi di paesaggio etc.) tale funzione assume la forma di un istogramma di frequenza.
- Calcolo dei Pesi: le mappe standardizzate di danno relative agli attributi (fase precedente) vengono fra loro aggregate *in funzione dell'importanza* relativa degli attributi rispetto a ciascun criterio e dei criteri rispetto al goal: tali fattori di importanza sono espressi tramite dei pesi calcolati con il metodo dei *confronti a coppie*;
- Ricomposizione gerarchica: attraverso procedure di *Map Algebra*, gestite in ambiente GIS, gli strati informativi standardizzati vengono aggregati tramite somme pesate, risalendo la gerarchia del danno (Figura 7) dalle foglie fino alla sommità;
- Scenari di Danno: il calcolo dei pesi dei livelli della gerarchia e la ricomposizione gerarchica che dà come risultato finale la mappa del danno da incendi, non vengono effettuati una sola volta ma ben tre volte. Infatti sono computati tre differenti set di pesi cui corrispondono altrettante mappe di danno. Tali mappe sono denominate con il termine di "scenari" dato che rappresentano la stima del danno potenziale da incendio secondo tre differenti punti di vista. Nel primo caso (*Scenario Equilibrato*) tutti gli elementi della gerarchia (criteri ed attributi) hanno un ugual peso in modo da effettuare una valutazione il più possibile equidistante rispetto ad ogni fattore di

indagine. Nel secondo caso (*Scenario Ambientale*) viene dato un maggior peso agli attributi del Danno Ambientale, quindi agli effetti del fuoco su zone di pregio e paesaggi tipici, mentre nel terzo caso (*Scenario Antropico*) è data più importanza ai fattori del Danno Economico-Antropico, quindi alla perdita, in caso di incendio, di servizi ed infrastrutture legate all'attività dell'uomo e, in casi estremi, anche di vite umane.

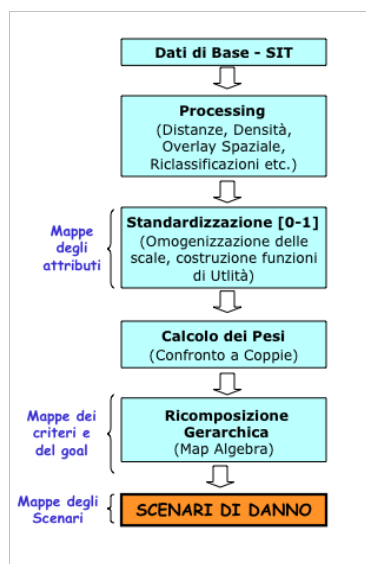


Figura 8 Fasi metodologiche per la costruzione della mappa del danno (scenari)

Infine è importante sottolineare che in tutte le fasi della valutazione del danno da incendi, sono state escluse le aree urbanizzate in quanto le dinamiche di un evento incendiario all'interno di un sistema insediativo sono molto diverse rispetto a ciò che accade alla scala territoriale, in ambienti vegetati (naturali e seminaturali). Inoltre la scala di valutazione (sia economica che di qualità ambientale) nei centri urbani è effettivamente poco paragonabile (si pensi al valore immobiliare nei diversi centri storici) con quella adottata per i territori extraurbani.

La valutazione del danno atteso, dovuto alla propagazione di un incendio boschivo, deve tener conto della perdita, in molti casi irreversibile, di elementi territoriali ad elevato valore monetario (colture pregiate, infrastrutture, case sparse etc) e spesso strettamente connessi al livello di antropizzazione dell'area. Pertanto il primo criterio di analisi viene quindi denominato Danno Economico-Antropico (Figura 7) e comprende tutti quegli attributi relativi a dati territoriali su cui la propagazione di un incendio boschivo può provocare *conseguenze potenzialmente monetizzabili* (valore dei terreni) e quindi un danno strettamente connesso al *livello di antropizzazione del territorio* (infrastrutture tecnologiche, complessi extraurbani, servizi al turismo, misure antincendio).

Le varie tipologie di *reti tecnologiche* costituiscono un bersaglio critico in caso di incendio, infatti, se colpite da fuoco, dovranno innanzitutto essere ripristinate causando una prima

tipologia di “*danno da perdita*”, inoltre possono esse stesse incrementare la propagazione dell’incendio sul territorio, quindi provocare un danno aggiuntivo che potremmo identificare come “*danno da potenziamento dell’incendio*”. Da quanto detto risulta evidente come la prossimità alle infrastrutture tecnologiche consente di individuare le zone dell’Area del Tufo maggiormente danneggiabili dal fuoco.

Nell’analisi del Rischio Incendi ed in particolare nella stima del Danno vengono escluse le aree urbanizzate in quanto lo studio è focalizzato sulle superfici vegetate, tuttavia quei *complessi sparsi* (scolastici, ospedalieri, sportivi, sociali, religiosi, cimiteriali), che si trovano *in aree extraurbane*, ma in prossimità dei nuclei abitati più importanti rappresentano un elemento del territorio che maggiormente può essere danneggiato in caso di propagazione del fuoco perché l’evento calamitoso può causare sia la perdita delle vite umane che frequentano tali edifici, sia la compromissione funzionale degli stessi complessi.

La presenza di *pozzi a servizio antincendio* costituisce invece per definizione un elemento di riduzione del danno connesso alla propagazione del fuoco: le porzioni di territorio più marginali rispetto alla distribuzione spaziale dei pozzi risulteranno quindi quelle più danneggiabili in caso di sviluppo delle fiamme.

La distribuzione dei *servizi al turismo* viene inclusa nello studio del danno economico antropico in quanto le aree dove sono posizionati poderi ed agriturismo, così come le zone termali sono quelli più danneggiabili dalla propagazione di un fuoco che potrebbe compromettere in vario grado funzioni turistiche e, in casi di maggiore calamità, anche le vite umane che possono fruire di tali servizi.

L’analisi degli *usi del suolo e del valore dei terreni* risulta poi di fondamentale importanza nello studio del danno economico da incendi in quanto permette di individuare le classi di valore dei terreni ed di identificare le colture di maggiore pregio dove il danno causato da un potenziale incendio risulterebbe maggiormente significativo. Vengono pertanto classificate le varie tipologie di uso del suolo in funzione della possibile perdita economica dovuta ad un incendio, potendo questo provocare un danno sia sui terreni, che sulle colture in atto.

A tal proposito, la classificazione delle diverse tipologie di uso del suolo secondo classi di valore viene fatta sulla base delle indicazioni fornite dalla Regione Toscana (ARSIA) che indica i valori agricoli medi delle tipologie di colture presenti nei terreni delle regioni agrarie 1 e 3 della Provincia di Grosseto all’interno delle quali ricadono i comuni dell’Area del Tufo.

In aggiunta alle analisi sopra descritte è importante sottolineare che una corretta valutazione del danno atteso, dovuto alla propagazione di un incendio boschivo, deve tener conto della perdita, in molti casi irreversibile, di tutte quelle *risorse ad alto pregio ambientale* (paesaggi locali, zone di protezione speciali, oasi faunistiche, siti storico-archeologici etc.).

Per individuazione delle porzioni di territorio dell’Area del Tufo più danneggiabili dal passaggio del fuoco viene pertanto considerato un *secondo criterio* di valutazione denominato *Danno Ambientale* (Figura 7). Tale criterio considera tutti quegli attributi territoriali connessi

a risorse la cui perdita risulta difficilmente esprimibile in termini monetari (es. sistemi di paesaggio peculiari dell'Area del Tufo, risorse naturali, oasi, parchi etc.) e quindi comprende le risorse del territorio in cui il danno provocato dallo sviluppo di un incendio è sicuramente irreversibile, dato che andrebbe ad alterare la qualità ed il valore ambientale dell'area di studio. La presenza nel territorio dell'Area del Tufo di *zone vincolate e zone da tutelare con norma di piano* è molto importante nell'analisi del danno da incendi che, in caso di sviluppo e propagazione delle fiamme, provocherebbero conseguenze più gravi proprio nelle zone il cui valore ambientale è sottoposto a politiche di tutela.

Analogamente a quanto esposto per le zone vincolate, la presenza nel territorio dell'Area del Tufo di zone di pregio ambientale è fondamentale nell'analisi del danno da incendi che, in caso di innesco e sviluppo del fuoco, inducono conseguenze più forti proprio nelle zone classificate ad *alto valore ambientale*, con compromissione o addirittura perdita (in tal caso irreversibile) di *elementi irriproducibili* (es: SIC, SIR, ZPS).

L'analisi delle *identità paesistiche* rappresenta un fattore molto importante nella stima del danno da incendi in quanto si ritiene che sia assolutamente da evitare, a seguito di un incendio, la perdita o comunque la riduzione del valore ambientale di aree caratterizzanti il paesaggio tipico dell'Area del Tufo che fornisce a questi luoghi una connotazione unica all'interno del territorio non solo provinciale, ma anche regionale e nazionale.

Lo studio del danno si basa innanzitutto sull'analisi dei *sistemi di paesaggio* (unità e sub-unità) riportate nel Piano Strutturale integrato dei tre comuni dell'area. Nell'ambito dell'analisi del danno da incendi vengono quindi classificate le diverse sub-unità di paesaggio (maggiore livello di disaggregazione possibile) in funzione della "tipicità" dello stesso, attribuendo quindi un maggiore valore standardizzato di danno a quelle zone, denominate "canaloni", più connotanti il paesaggio tufaceo. Nella fase successiva la distribuzione spaziale del danno atteso ottenuta in funzione delle caratteristiche di tipicità dell'ambiente tufaceo posseduta dai vari subsistemi viene integrata con i dati relativi ai *Geositi (puntuali ed areali)*, alle *Grotte e Buche Tufacee* ed alle *Vie Cave* che forniscono informazioni di dettaglio relative ad elementi fortemente caratterizzanti l'Area del Tufo e la sua identità paesistica.

4.3 I risultati della valutazione del danno: scenari a confronti

In questa fase tutte le mappe standardizzate di danno potenziale da incendi (sia economico-antropico che ambientale relative agli attributi dell'albero gerarchico di Figura 7 vengono fra loro *aggregate*. L'integrazione di tutti gli strati informativi viene fatta tramite somme pesate attribuendo, con il *metodo dei confronti a coppie di Saaty* dei pesi rappresentativi dell'importanza degli attributi rispetto al criterio sovraordinato, e dei due criteri rispetto al goal. L'attribuzione dei pesi ai vari livelli della gerarchia di non è tuttavia univoca, ma varia a seconda di quali elementi siano ritenuti prioritari nella valutazione del danno: vengono infatti

computati *diversi set di pesi* cui corrispondono altrettanti scenari di valutazione del danno. La possibilità di costruire scenari di valutazione del danno fra loro differenti risulta importante in un processo di pianificazione del territorio, in quanto tali scenari rappresentano i vari *punti di vista* secondo cui il problema può essere valutato ed inquadrato. Inoltre, attraverso la costruzione di scenari alternativi di danno, è possibile cioè identificare quelle porzioni dell'area del Tufo che risultano sempre fortemente danneggiabili, pur modificando i pesi della gerarchia i quali rappresentano i “parametri” del sistema di analisi multicriteri.

Nell'attribuire i pesi ai diversi livelli della gerarchia sono stati elaborati, in accordo con l'amministrazione provinciale, *tre scenari* distinti che vengono di seguito descritti.

- I. Scenario Equilibrato: in questo scenario viene attribuito un ugual peso a tutti gli elementi della gerarchia senza privilegiarne alcuno, ma fornendo una valutazione il più possibile equidistante rispetto a tutti gli elementi di analisi;
- II. Scenario Ambientale: in questo scenario viene attribuito un maggior peso al Danno Ambientale ed ai suoi attributi, considerando più danneggiabili (quindi maggiormente da tutelare) le porzioni dell'area di studio dove sono presenti zone di pregio (sia naturale che antropico), paesaggi tipici dell'area del tufo, zone a vincolo paesaggistico, idrogeologico, architettonico e monumentale;
- III. Scenario Antropico: in questo scenario viene attribuito un maggior peso al Danno Economico-Antropico ed ai suoi attributi, considerando più danneggiabili (quindi maggiormente da tutelare) le porzioni dell'area di studio più antropizzate, quindi la aree dove sono localizzati complessi extraurbani ad uso civico e servizi al turismo (in cui un incendio può causare la perdita anche di vite umane), le zone dove sono presenti reti tecnologiche (da ripristinare se danneggiate dal fuoco), le zone più distanti dai pozzi a servizio antincendio (meno accessibili dai mezzi di spegnimento del fuoco).

In riferimento alla struttura gerarchica di Figura 7 (si considerano solo i primi tre livelli a partire dal goal) vengono costruite tre matrici dei confronti a coppie: M1 in cui i due criteri vengono confrontati rispetto al Goal, M2 in cui i cinque attributi del Danno Economico-Antropico vengono confrontati a coppie in relazione al criterio stesso, M3 in cui i tre attributi del Danno Ambientale vengono confrontati fra loro in relazione al criterio da cui dipendono. Dato che M1 è una matrice di rango 2, essa risulterà sempre consistente ($CR=0$), mentre il rapporto di consistenza CR deve essere calcolato per le rimanenti matrici, dovendo esso essere inferiore alla soglia del 10% (0,1). Le matrici M2 (rango 5) ed M3 (rango 3), i cui elementi sono i “coefficienti di dominanza” secondo la scala semantica di Saaty, vengono riportate in Figura 9 a) e b) dove è indicato il vettore dei pesi (componenti dell'autovettore corrispondente all'autovalore principale di ogni matrice) e, per M2, il rapporto di consistenza CR. In Tabella 3 viene riportato uno schema dei pesi di importanza relativa dei vari elementi della gerarchia (criteri ed attributi) secondo i tre scenari adottati.

a) Danno Economico-Antropico							b) Danno Ambientale				
M2 - Matrice dei Confronti a Coppie Attributi Danno Economico-Antropico							M3 - Matrice dei Confronti a Coppie Attributi Danno Ambientale				Pesi
	Complessi Extra Urbani	Servizi al Turismo	Valore Suoli	Reti Tecnologiche	Pozzi Antincendio	W		Zone Pregio Naturale	Vincoli e Tutela di Piano	Identità Paesistiche	W
Complessi Extra Urbani	1,00	2,00	2,00	2,00	2,00	0,32	Zone Pregio Naturale	1,00	1,00	1,00	0,33
Servizi al Turismo	0,50	1,00	1,00	3,00	3,00	0,24	Vincoli e Tutela di Piano	1,00	1,00	1,00	0,33
Valore Suoli	0,50	1,00	1,00	3,00	3,00	0,24	Identità Paesistiche	1,00	1,00	1,00	0,33
Reti Tecnologiche	0,50	0,33	0,33	1,00	1,00	0,10	Sum	3,00	3,00	3,00	1,00
Pozzi Antincendio	0,50	0,33	0,33	1,00	1,00	0,10					
Sum	3,00	4,67	4,67	10,00	10,00	1,00					
CR = 0,04											

Figura 9 Matrici dei confronti a coppie a) Danno economico-antropico, b) Danno ambientale

Tabella 3 Pesi di importanza relativa dei criteri e degli attributi adottati per la stima del danno economico-antropico e del danno ambientale nei tre scenari di valutazione

Scenario Equilibrato	Danno Economico-Antropico					Danno Ambientale		
	0,5					0,5		
	Comp. Extra Urbani	Servizi al Turismo	Valore Suoli	Reti Tecnol.	Pozzi Antinc.	Zone Pregio Naturale	Vincoli e Tutela di Piano	Identità Paes.
	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,333	0,333	0,333
Scenario Ambientale	Danno Economico-Antropico					Danno Ambientale		
	0,35					0,65		
	Comp. Extra Urbani	Servizi al Turismo	Valore Suoli	Reti Tecnol.	Pozzi Antinc.	Zone Pregio Naturale	Vincoli e Tutela di Piano	Identità Paes.
	0,32	0,24	0,24	0,10	0,10	0,333	0,333	0,333
Scenario Antropico	Danno Economico-Antropico					Danno Ambientale		
	0,65					0,35		
	Comp. Extra Urbani	Servizi al Turismo	Valore Suoli	Reti Tecnol.	Pozzi Antinc.	Zone Pregio Naturale	Vincoli e Tutela di Piano	Identità Paes.
	0,32	0,24	0,24	0,10	0,10	0,333	0,333	0,333

A questo punto viene applicata il principio di ricomposizione gerarchica: per ogni scenario le mappe di danno potenziale standardizzato [0-1] relative ad ogni attributo sono moltiplicate per i pesi corrispondenti (livello degli attributi) e vengono fra loro sommate; i risultati così ottenuti sono a loro volta moltiplicati per i pesi del Danno Economico-Antropico e del Danno Ambientale rispetto al goal (anche essi variabili da scenario a scenario) e fra loro sommati (somme pesate). Per ogni scenario le *mappe finali* derivanti dalla fase di ricomposizione gerarchica ed anche esse standardizzate nell'intervallo 0-1 rappresentano la distribuzione geografica dei valori dell'indice di danno: valori prossimi all'unità corrisponderanno a zone fortemente danneggiabili dal fuoco, valori vicino allo zero indicheranno aree dove il danno dovuto al passaggio di un incendio risulta più lieve.

Dato che ad ogni scenario corrisponde un set di pesi differente (Tabella 3), i livelli dell'indice di danno varieranno sul territorio in maniera differente a seconda se è attribuito lo stesso peso a tutti gli elementi di analisi (*scenario 1*) oppure se viene attribuito un maggior peso alla tutela delle risorse ambientali (*scenario 2*), oppure ai fattori connessi con il livello antropizzazione del territorio (*scenario 3*). Il confronto fra le mappe di danno da incendi relative ai tre scenari (Figura 10) mostra innanzitutto una grande stabilità dei risultati ottenuti: pur modificando ampiamente i pesi dei criteri e degli attributi di valutazione le aree

maggiormente danneggiabili dal passaggio di un incendio risultano, sostanzialmente, le stesse. Tali zone, al alto indice di danno (valori prossimi all'unità), sono localizzate nelle aree vegetate, ma contigue rispetto ai principali centri urbani. In pericolo si distingue, per l'alto indice di danno comune a tutti gli scenari, una vasta area posta ad est rispetto all'abitato di Selvena, caratterizzata da un marcato pregio ambientale. Analogamente spiccano le aree contigue a Pitigliano, Sovana e Sorano per le peculiari identità paesaggistiche (ambiente tufaceo) e per la presenza di numerose zone di pregio archeologico e monumentale. Nella parte meridionale dell'area del tufo sono ugualmente presenti zone ad elevato indice di danno, corrispondenti a territori fortemente vincolati e caratterizzati da colture di elevato valore economico. In particolare nello *Scenario Antropico* le porzioni di territorio più danneggiabili sono maggiormente localizzate in prossimità dei centri urbani, dato che la densità di complessi extraurbani ad uso civico e di servizi al turismo risulta maggiore nelle zone di bordo fra i sistemi insediativi e le aree vegetate. Nella mappa corrispondente allo *Scenario Ambientale*, invece, sono più evidenti le aree di pregio ambientale e quelle corrispondenti ai subsistemi di paesaggio tipici dell'area del tufo : in tutte queste zone nelle l'indice di danno assume valori massimi. Infine la mappa corrispondente allo *Scenario Equilibrato*, pur non discostandosi molto dalle precedenti (in particolare da quella dello Scenario Ambientale), presenta una distribuzione sul territorio dei livelli di danno intermedia rispetto ai precedenti due scenari.

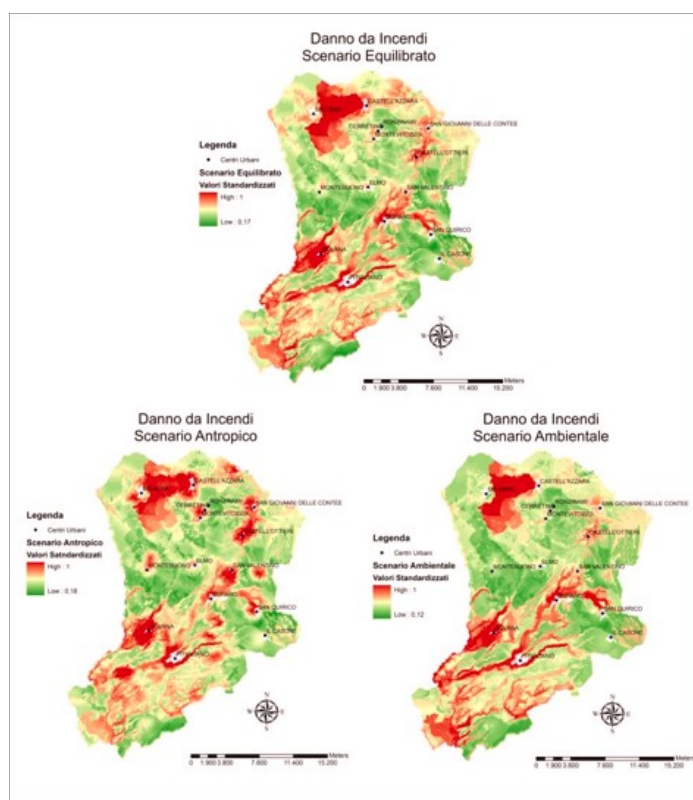


Figura 10 Mappe del Danno potenziale standardizzato da incendi nei tre Scenari di Valutazione (le aree urbanizzate escluse dall'analisi sono rappresentate in bianco)

5 LA VALUTAZIONE INTEGRATA DEL RISCHIO

Il rischio incendi è determinato da due elementi fondamentali: il primo è la *probabilità* che l'evento sfavorevole (l'incendio) si verifichi, quindi la *pericolosità* del fenomeno, l'altro è la *conseguenza* che l'evento comporta sul territorio in esame, cioè il *danno* da esso provocato.

La costruzione della mappa del rischio viene quindi ottenuta moltiplicando lo strato informativo della pericolosità per quello del danno (Scenario 1-2-3).

Il confronto fra le mappe corrispondenti ai tre scenari di Rischio (Figura 11 a,b,c) mostra una sostanziale invarianza dei risultati relativi alla distribuzione spaziale delle aree più critiche in caso di incendio.

Ogni mappa del rischio deriva, infatti, dal prodotto di quella della pericolosità (univoca) per ciascuna delle tre mappe del danno (Scenari Equilibrato, Ambientale ed Antropico) le quali però, come esplicitato nel paragrafo 4.3, sono a loro volta molto simili fra loro.

I valori numerici dell'indice di rischio non raggiungono mai il valore unitario: ciò significa che non esistono (per nessuno degli scenari) porzioni dell'area del tufo in cui la pericolosità ed il danno risultino contemporaneamente massimi (1).

Dato che la mappa di pericolosità presenta numerose zone in cui il valore standardizzato dell'indice assume valori vicini a zero (lieve probabilità di innesco dell'incendio), pur essendo in tali aree il danno elevato (valori prossimi ad uno), il corrispondente valore di rischio incendi risulta comunque di poco superiore allo zero.

I tre scenari di rischio presentano, infatti, un'ampia porzione di territorio dove, data la bassa probabilità di innesco del fuoco (basata sulle informazioni relative agli eventi incendiari effettivamente accaduti in questo territorio), il rischio assume valori molto bassi.

Le aree dove, invece, il rischio risulta elevato sono poco numerose, ma comuni a tutti e tre gli scenari : esse corrispondono alla zona contigua al centro urbano di Selvena e ad un'area marginale posta al confine nord orientale del comune di Castell'Azzara.

Valori medio-alti ed alti di rischio incendi appartengono ad un insieme "frastagliato" di aree localizzate ai bordi dell'urbanizzato di Sovana, fra Soivana e Pitigliano ed in corrispondenza di una fascia posta a sud di Pitigliano in direzione nord-est, sud-ovest.

Mentre le aree di Selvena e Castell'azzara hanno un alto indice di rischio in tutti gli scenari, le altre zone sopra descritte presentano valori più elevati nello scenario ambientale rispetto allo scenario antropico.

Lo scenario equilibrato, intermedio fra gli altri due, possiede però un range di variazione del rischio più elevato, potendo esso assumere valori massimi pari a 0,75, superiori ai corrispondenti valori massimi relativi agli altri due scenari (0,64 e 0,69 rispettivamente per lo scenario ambientale ed antropico); ciò significa che lo scenario equilibrato è in grado di isolare con maggiore precisione le aree in cui la rischiosità del fenomeno incendiario è effettivamente molto alta.

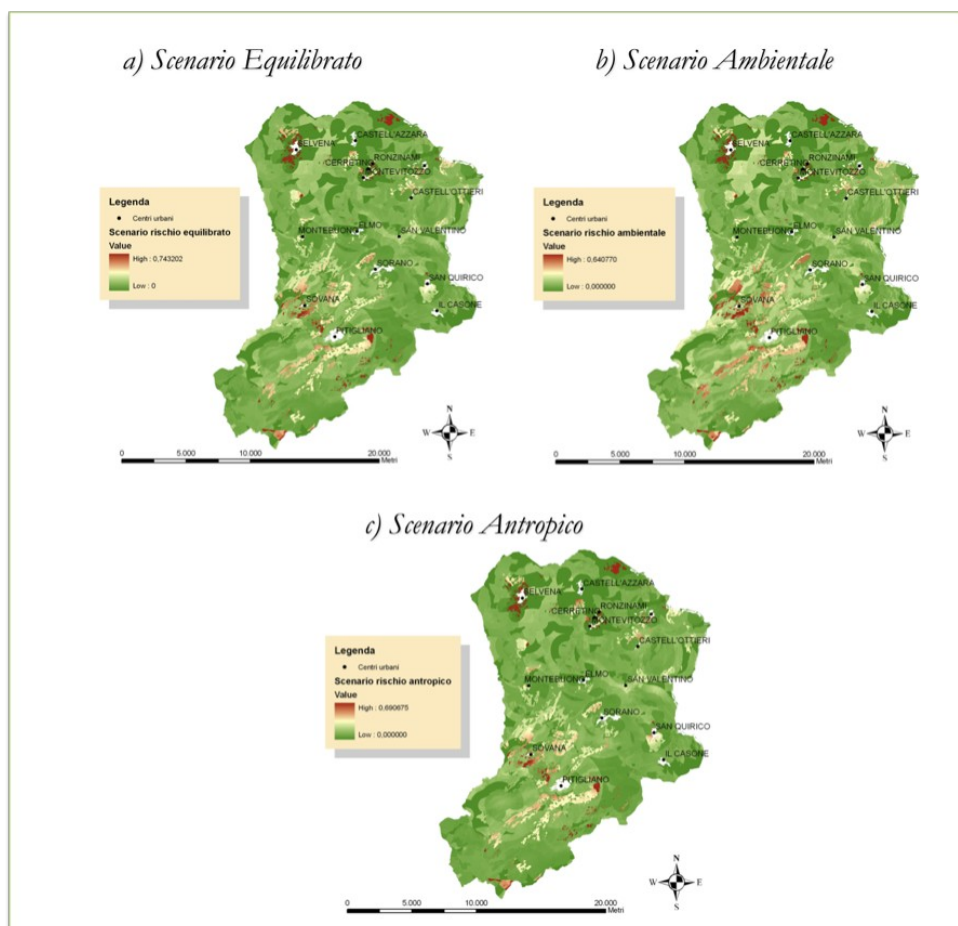


Figura 11 Mappe del Rischio Incendi nei tre Scenari di Valutazione a) Equilibrato, b) Ambientale, c) Antropico (le aree urbanizzate escluse dall'analisi sono rappresentate in bianco)

6 OSSERVAZIONI CONCLUSIVE E SVILUPPI DELLA RICERCA

La metodologia proposta per la valutazione del rischio e l'individuazione delle *aree zone di maggiore criticità* rappresenta un efficiente ed efficace strumento di supporto alle decisioni per i decision makers (soprattutto a quelli istituzionali; infatti lo uno strumento progettato, attraverso la valutazione sia della *pericolosità* del fenomeno che del *danno atteso*, presenta numerosi *punti di forza* di seguito sintetizzati:

- La selezione e la localizzazione delle aree a maggior rischio sulla base di appropriati fattori territoriali è di fondamentale importanza per allestire *piani antincendio e politiche di tutela delle aree boscate*;
- L'analisi dettagliata delle *variabili territoriali (risorse ed invarianti)* coinvolte nello studio del rischio incendi risulta di fondamentale importanza per la definizione e l'aggiornamento del *quadro conoscitivo* degli strumenti di *pianificazione strategica*, sia a livello provinciale che comunale;
- Il sistema di supporto alle decisioni proposto in questo studio è *molto flessibile*: il numero e la natura sia delle variabili necessarie alla stima della pericolosità, sia dei criteri per la

valutazione del danno potenziale, possono essere incrementati ed aggiornati, modificando la complessità dell'albero decisionale della pericolosità e l'assetto della struttura gerarchica multicriteri del danno. In questo modo è possibile migliorare lo strumento implementato in funzione delle *esigenze conoscitive degli stakeholders* e soprattutto della *qualità e del livello di dettaglio dei dati di partenza a disposizione*;

- La metodologia proposta, consentendo di valutare le aree a maggior rischio incendi con un sufficiente livello di disaggregazione spaziale, comporta una *riduzione dei tempi e dei costi* in tutte le fasi del processo di pianificazione;
- Il sistema presenta una *grande trasparenza* in tutte le fasi del processo decisionale: (individuazione e geoprocessing delle variabili influenti nell'analisi della pericolosità, determinazione e rappresentazione dei criteri e degli attributi adottati per lo studio del danno, estrazione di regole decisionali, computazione dei pesi etc), elemento assai importante secondo un'ottica di gestione e *pianificazione* del territorio in modo *condiviso e partecipato*.

Bibliografia

- Amparo Alonso-Betanzos A. (2003) *An intelligent system for forest fire risk prediction and fire fighting management in Galicia*, Technical Report, Department of Computer Science, Faculty of Informatics, Coruna, Spain
- Cheikh Mbow A. (2004) *Spectral indices and fire behavior simulation for fire risk assessment in savana ecosystems*, Technical Report, Université de Sherbrooke, Canada
- Colin C. (2004) Woodland fire hazard and risk: Problems, definitions, and context, *Forest Ecology and Management* n.211, pp 340-357
- Grandell F.(1991) *Aspects of risk theory*, Springer, New York
- Han J., Kamber M. (2000) *Data mining: concepts and techniques*, Morgan Kaufmann
- Jankowsky P. (1995) Integrating geographical information system and multiple criteria decision making methods, *International Journal of Geographical Information Systems*, n.9(3), pp. 251-273
- Malczewski J. (1999) *GIS and Multicriteria Decision Analysis*, Wiley, New York
- Saaty T.L. (1980 a) *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw Hill, New York
- Saaty T.L. (1980, b) *The Analytic Hierarchy Process for Decision in a Complex World*, RWS Publications, Pittsburg
- Saaty T.L. (1988) *Decision Making for Leaders-The Analytical Hierarchy Process for decisions in a complex world*, RWS Publications, Pittsburgh, PA
- Simonetti S. (2002) *Rischio Ambientale: il rischio della civiltà industriale*, D. Flaccovio, Palermo

- Tomlin C.D. (1990) *Geographic Information Systems and Cartographic Modelling*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New York
- Siddiqui M.Z. (1996) Landfill siting using geographic information systems:a demonstration, *Journal of Enviromental Engineering*, n.122(6), p.p.515-523
- Vargas L.G. (1990). An Overview of the Analytic Hierarchy Process and its Applications, *European Journal of Operational Research*, n.48, p.p.2-8
- Vincke P. (1992)*Multicriteria decision-aid*, Wiley, New York
- Voogd H (1983) *Multicriteria Evaluation for urban and regional planning*, Pion, London

Abstract

The aim of this research is to construct a decision support system for risk assessment at territorial scale: the case of woodland fire risk is implemented and discussed.

The synergy between data mining techniques, able to extract decision rules from large geographical dataset, multicriteria decision aiding procedures and GIS based tools is experimented on a prototypal case study area, the tuffaceous zone of Grosseto Province, a semi-natural area whose touristic peculiarity is significantly due to its geological features.

Risk evaluation is based on the analysis of two complementary elements: the probability computation of calamitous event occurrence (fire ignition) and the estimation (*ex ante*) of the disastrous effects provoked by fire propagation in the territory under study.

In this paper the woodland fire danger is determined through artificial intelligence techniques and specifically via decision trees tools, which enables to classify each elementary portion of the study area in relation to its fire trigger probability. On the other side the potential damage caused by flames expansion is estimated by means of spatial multicriteria procedures among which the Analytical Hierarchical Process (AHP) is adopted.

An integrated risk index and its spatial distribution in the study area is devised combining danger and damage maps. Several fire risk scenarios are computed and represented in a GIS environment: such decision maps represent a solid base to support decision makers (both institutional and not), local stakeholders and technicians to make adequate choices in the field of territorial protection, monitoring and planning.