

Telerilevamento e analisi spaziali per la stima del rischio incendi di vegetazione nella Regione Puglia

Giuseppe Cillis ⁽¹⁾,
Gabriele Nolè ⁽¹⁾,
Fortunato De Santis ⁽¹⁾,
Lucio Pirone ⁽²⁾,
Domenico Donvito ⁽³⁾,
Francesco Vito Ronco ⁽³⁾,
Antonio Lanorte ⁽¹⁾

Remote sensing and spatial analysis for estimating vegetation fire risk in the Puglia Region

Forest fires represent a growing threat to ecosystems and communities in the EMEA region (Europe, Middle East, and North Africa), with the year 2023 ranking among the five most critical years since 2000. In Italy, forest fires showed a significant intensification, with a 36% increase in total burned areas compared to 2022, affecting 1073 km² of territory, of which 157 km² were covered by forests. The analysis of affected areas' composition revealed that 63% were evergreen broadleaf forests, 17% conifers, and 15% deciduous broadleaf forests. Climate change is amplifying the problem, extending fire seasons and increasing the frequency of "megafires", events of intensity exceeding the capability of traditional containment systems. This trend is expanding into Central and Northern Europe, regions traditionally less exposed to these risks. Notably, over 90% of fires in the EU are of anthropogenic origin, with Italy recording only 2% of fires due to natural causes. In response to these challenges, we present an innovative methodology for fire risk assessment that was applied to the Puglia Region. The approach is based on the development of a Global Fire Risk Index that integrates both hazard and vulnerability factors, aligning with European Community directives. The methodology relies on open-source GIS systems to process territorial data with a 20-meter resolution, and includes morphological, vegetational, climatic, and anthropic variables. The analysis was initially conducted at the single pixel level and subsequently aggregated at the municipal scale, thus offering a dual perspective: an overview for administrative planning and a detailed analysis for localized interventions. This methodological approach, beyond its scientific value, has been integrated into the 2023-2025 Forest Fire Prevention, Prediction, and Active Fighting Plan of the Puglia Region, providing an operational tool for fire risk management in the territory. Our results significantly contributes to the evolution of fire planning tools, responding to the need for more sophisticated approaches to address increasingly complex risk scenarios influenced by climate and socioeconomic changes.

Keywords: Vegetation Fires, Risk Zoning, GIS, Multicriteria Analysis, Forest Fire Planning

Introduzione

Gli incendi rappresentano un pericolo significativo sia per le persone che per l'ambiente, soprattutto nelle aree densamente popolate. Infatti nella Comunità Europea, questa problematica è molto sentita anche in considera-

zione dell'aumento della frequenza di tali eventi che si è registrato anche in aree non particolarmente interessate in passato da incendi boschivi. Dal 2006 si è assistito a un graduale incremento con annate critiche come quelle del 2017, 2021, 2022 e 2023 (JRC 2023). Il Rapporto 2024 del Joint Research Center della Commissione Europea sugli incendi boschivi in Europa, Medio Oriente e Nord Africa (San-Miguel-Ayanz et al. 2024) mostra che il 2023 è stato uno dei cinque anni peggiori per gli incendi boschivi nell'area EMEA dal 2000 sia per numero di incendi che per estensione di alcuni eventi. Gli incendi hanno colpito oltre 500.000 ettari di terreni naturali, pari a circa la metà dell'isola di Cipro. Negli ultimi anni, gli incendi catastrofici sono stati frequenti nell'Unione Europea e nei Paesi limitrofi (JRC 2024). L'anno 2023 non ha fatto eccezione: nell'area suddetta si sono verificati diversi incendi impossibili da tenere sotto controllo con i tradizionali mezzi antincendio, i cosiddetti "megaincendi", ovvero quegli incendi definiti dalla soglia dei 500 ha di superficie percorsa (Pereira et al. 1999) L'Italia, se si considera l'ultima analisi effettuata dall'ISPRA invece, ha affrontato incendi di vegetazione che hanno percorso una superficie totale di

□ (1) CNR-IMAA, c. da Santa Loja, Zona Industriale, Tito Scalo, 85050 Potenza (Italy); (2) Dipartimento Ambiente, Paesaggio e Qualità Urbana, Regione Puglia, Bari (Italy); (3) Sezione Protezione Civile, Regione Puglia, Bari (Italy)

@ Giuseppe Cillis (giusepecillis@cnr.it)

Ricevuto: Jan 21, 2025 - Accettato: Mar 24, 2025

Citazione: Cillis G, Nolè G, De Santis F, Pirone L, Donvito D, Ronco FV, Lanorte A (2025). Telerilevamento e analisi spaziali per la stima del rischio incendi di vegetazione nella Regione Puglia. *Forest@* 22: 27-38. - doi: [10.3832/efor4800-022](https://doi.org/10.3832/efor4800-022) [online 2025-04-22]

1073 km², di cui circa 157 km² erano ecosistemi forestali terrestri. Il 63% di questi erano costituiti da boschi di latifoglie sempreverdi, come le leccete e la macchia mediterranea, il 17% da boschi di conifere e il 15% da boschi di latifoglie decidue, prevalentemente misti a querce. Gli incendi del 2023 in Italia sono stati significativi sia per superficie, seconda solo al 2021 negli ultimi sei anni, sia per la concentrazione in alcune province specifiche. Rispetto al 2022, si è verificato un aumento del 36% delle superfici totali percorse da incendi e un incremento del 6% delle sole superfici forestali percorse da incendi (ISPRA 2024).

L'impatto del cambiamento climatico sugli incendi diventa ogni anno più evidente. Il rapporto EFFIS (JRC 2023) evidenzia una chiara tendenza all'aumento dei livelli di pericolo di incendio, stagioni di fuoco più lunghe e "megaincendi" più frequenti e a rapida diffusione. Gli incendi non sono più limitati all'Europa meridionale, ma stanno diventando una minaccia crescente anche per le regioni dell'Europa centrale e settentrionale (Jones et al. 2024). Oltre il 90% degli incendi boschivi nell'UE è causato da attività umane (Martínez et al. 2009). In Italia, questa tendenza è particolarmente evidente, in quanto solo il 2% degli incendi è dovuto a cause naturali. Inoltre, secondo Turco et al. (2018), il recente aumento dell'attività degli incendi in alcune aree può essere legato ai cambiamenti socio-economici, che, insieme a quelli climatici, possono creare configurazioni paesaggistiche ancora più pericolose e imprevedibili. Per queste ragioni, sono necessari nuovi e più aggiornati strumenti che possano rispondere alle nuove esigenze di pianificazione antincendio boschivo.

I modelli statici e dinamici di incendio, come mappe di pericolosità e vulnerabilità sempre più accurate, possono fornire supporto alle decisioni in fase di previsione e quindi nelle attività di prevenzione (Trucchia et al. 2022). Que-

sti strumenti forniscono alle autorità di Protezione Civile e ai responsabili delle decisioni le risorse necessarie per affrontare anomalie occasionali nelle tendenze stagionali degli incendi. Le mappe statiche del rischio di incendio sono strumenti cruciali per la gestione degli incendi boschivi, in quanto incorporano vari fattori per valutare il rischio di incendio (Di Fazio & Modica 2009). Infatti, una zonizzazione del rischio è richiesta all'interno dei Piani regionali per la programmazione delle attività di previsione, prevenzione e lotta attiva contro gli incendi, così come previsto dalla Legge Quadro in materia di incendi boschivi n. 353 del 21 Novembre 2000 e così come indicato nelle Linee guida approvate con decreto ministeriale il 20 dicembre 2001. Queste mappe combinano tipicamente indicatori statici, come le caratteristiche del terreno (altitudine, pendenza, esposizione) e la vicinanza a strade e insediamenti, con fattori dinamici, come le condizioni di umidità del combustibile (Zhang et al. 2014, Konkathi et al. 2019).

I sistemi informativi geografici (GIS) sono comunemente utilizzati per integrare questi diversi fattori (Eugenio et al. 2016) in quanto contribuiscono ad integrare diverse variabili territoriali, come ad esempio il tipo di vegetazione, i fattori climatici e la vicinanza a corpi idrici (Alasli 2019).

Le modalità geospaziali di realizzazione degli indici di rischio sono numerose e in letteratura sono presenti diversi esempi. Quelli più interessanti si basano sull'applicazione di algoritmi di *machine learning* applicati ai diversi fattori predisponenti l'incendio oppure assegnando dei pesi agli stessi (Tonini et al. 2020, Trucchia et al. 2022, 2023).

In questo lavoro, viene proposta una nuova metodologia, applicata al contesto della Regione Puglia, per la valutazione del rischio incendio statico sulla base di fattori morfologici, vegetazionali, climatici e antropici. Il carattere innovativo di questa metodologia è la creazione di un

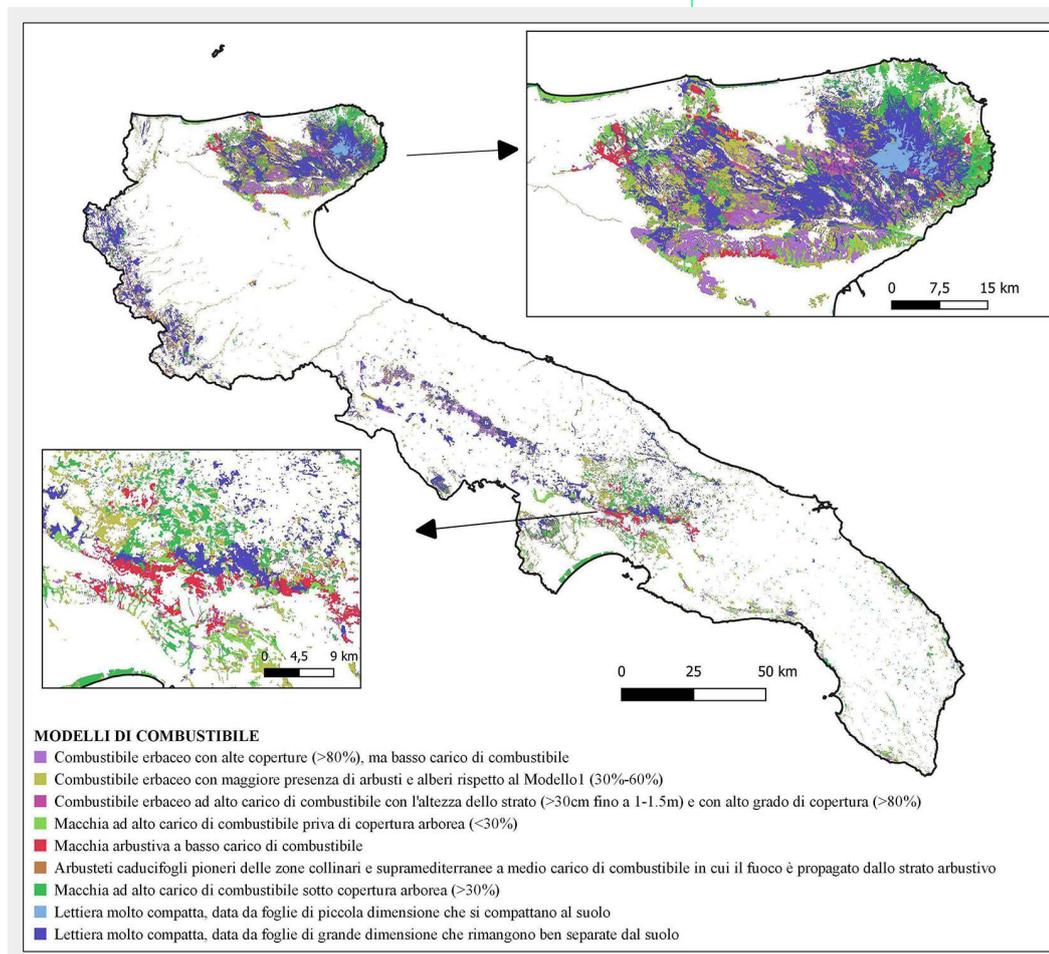


Fig. 1 - Carta dei modelli di combustibile con un dettaglio sul Gargano. Fonte: Dipartimento Protezione Civile Regione Puglia.

Tab. 1 - Numero di incendi boschivi, superfici percorse e medie a evento per il periodo 2012-2021. Rielaborazione dati del Piano AIB 2023-2025.

Anno	Num. Incendi Boschivi	Sup. Boscata (ha)	Sup. Non Boscata (ha)	Sup. Totale (ha)	Media Boscata/Evento (ha)	Media Totale/Evento (ha)
2012	497	4471	2914	7384	9	14.9
2013	307	1579	1429	3007	5.1	9.8
2014	188	635	481	1117	3.4	5.9
2015	372	1302	1518	2819	3.5	7.6
2016	291	1344	1417	2760	4.6	9.5
2017	402	4327	2006	6332	10.8	15.8
2018	144	322	198	520	2.2	3.6
2019	289	811	1221	2032	2.8	7
2020	341	1473	1595	3068	4.3	9
2021	409	3553	5133	8686	8.7	21.2
Totale	3240	19817	17912	37725	6.1	11.6
Media / Anno	324	1981.7	1791.2	3772.5	5.44	10.43

Indice di Rischio Globale d'incendio che tiene conto sia degli aspetti di pericolosità che di vulnerabilità, in linea con quanto proposto dal JRC (Oom et al. 2022). I diversi sottoindici complessi che compongono l'indice di rischio sono stati elaborati in ambiente GIS *open source* utilizzando dati realizzati *ex novo* oppure disponibili *online* e presso gli uffici regionali. Inoltre, tutti questi indici e sottoindici sono stati realizzati a livello di singolo pixel con una risoluzione di 20 metri e solo successivamente aggregati a livello comunale. Questo ha permesso di avere sia un quadro di insieme rispetto ai diversi ambiti amministrativi, sia di fornire un approccio che permette una valutazione a livello locale, cosicché la pianificazione possa essere più efficace. La mappatura del rischio così strutturata, inoltre, è stata inserita come *output* all'interno del Piano di previsione, prevenzione e lotta attiva contro gli incendi boschivi 2023-2025 (Protezione Civile Regione Puglia 2023).

Materiali e metodi

Area di studio

La Puglia si estende nel Mediterraneo seguendo un asse nord-ovest/sud-est, rappresentando la parte più orientale dell'Italia. La regione è caratterizzata da una notevole discontinuità territoriale, dovuta allo sviluppo irregolare della costa e a una morfologia superficiale molto variegata. La superficie totale della Puglia è di circa 19.350 km²: oltre la metà del territorio (53.2%) è pianeggiante, il 45.3% è collinare e poco più dell'1% è montuoso (Boenzi & Caldara 1990). L'uniformità dell'orografia della regione comporta lievi differenze climatiche tra le varie zone, influenzate non solo dalle modeste variazioni altimetriche, ma anche dalla conformazione topografica.

Secondo l'Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi naturali di Carbonio (Gasparini et al. 2022), il patrimonio forestale della Puglia copre una superficie di 191.738 ettari, suddivisi come segue: 142.349 ettari di bosco e 49.389 ettari di altre aree boscate. I dati dei due Inventari Forestali Nazionali completati (2005-2015) mostrano un aumento della superficie forestale in Puglia, che è passata da 179.040 a 191.738 ettari in dieci anni. Questo rappresenta un incremento totale di 12.698 ettari, con una crescita media annua di 1482 ettari. La maggior parte dei boschi e delle tipologie forestali sono distribuiti nell'area settentrionale della regione: questo ovviamente influenza la distribuzione dei modelli di combustibile e quindi del rischio incendi (Fig. 1).

Secondo i dati del Piano AIB 2023-2025, considerando gli ultimi 10 anni, la Puglia è la quinta regione italiana per nu-

mero di incendi boschivi e la quarta per superficie totale percorsa dal fuoco, dopo Sicilia, Sardegna e Calabria. Per quanto riguarda la superficie boscata percorsa, si posiziona al sesto posto. Analizzando gli incendi di estensione superiore ai 30 ettari (dati EFFIS) dal 2008 al 2021, la Puglia si colloca al sesto posto a livello nazionale per superficie totale percorsa dal fuoco. In questo periodo, si sono verificati circa 120 incendi di dimensioni superiori ai 30 ettari, con una media di circa 150 ettari per evento e 8.5 eventi all'anno.

A integrazione di quanto sopra riportato, nella Tab. 1 sono riassunti alcuni dei dati ufficiali relativamente al periodo 2012-2021 così come presentati sul Piano AIB e in Fig. S1 (Materiale supplementare) la localizzazione spaziale.

Inquadramento AIB della Regione Puglia: pianificazione e zonizzazione del rischio

Nella Regione Puglia è in vigore la legge regionale 12 dicembre 2016, n. 38, la quale reca norme in materia di contrasto all'innescio e la propagazione degli incendi boschivi e di interfaccia al fine di salvaguardare la pubblica e privata incolumità e gli ecosistemi agricoli e forestali, nonché di favorire la riduzione delle emissioni di anidride carbonica in atmosfera. Il documento, previsto per legge, che descrive le attività di pianificazione sull'antincendio boschivo a scala regionale è il "Piano triennale di previsione, prevenzione e lotta attiva contro gli incendi" (Protezione Civile Regione Puglia 2023).

Il Piano AIB è redatto sulla base della ricognizione e valutazione delle tecnologie, anche satellitari, idonee all'interpretazione dei sistemi previsionali, nonché di sorveglianza, monitoraggio e rilevamento dell'ambiente e del patrimonio forestale, che possono essere utilmente impiegati per il miglioramento degli strumenti di previsione, prevenzione e lotta attiva contro gli incendi boschivi, avvalendosi del dispiegamento preventivo dei reparti specializzati.

Nel quadro generale del Piano AIB, l'operatività viene definita annualmente nel "Programma Operativo di Azione", sulla base della ricognizione delle risorse strumentali, umane e finanziarie effettivamente disponibili in ciascun anno. Tale Programma Operativo, viene redatto e condiviso da tutti gli attori preposti all'attività AIB (CCFF, VVF, ARIF, Sezione Gestione Sostenibile e Tutela delle Risorse Forestali e Naturali), che compongono per quanto di competenza il "Tavolo Tecnico AIB permanente", istituito con D.G.R. n.377 del 14/03/2022.

Il Programma Operativo di Azione, è composto da diverse parti e una di queste riguarda la descrizione delle mo-

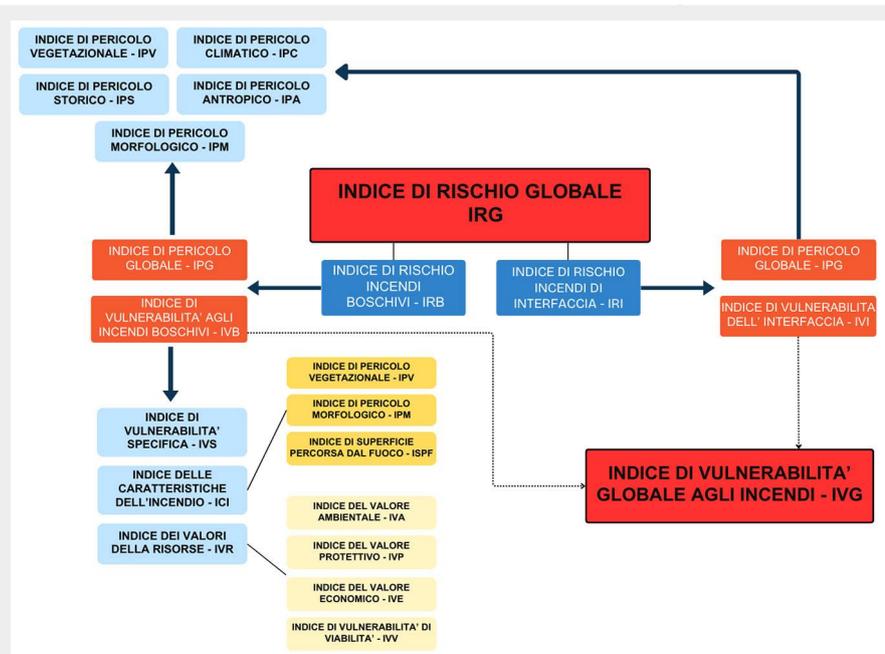


Fig. 2 - Schema degli indici e sottoindici elaborati.

grammi di riduzione del rischio ai diversi livelli amministrativi. Di recente sono state sviluppate diverse tecniche che utilizzano approcci integrati GIS e/o modelli complessi (D’Este et al. 2020) sulla base di diverse variabili fisiche. Inoltre, sono stati utilizzati approcci fisico/statistici e stocastici/causali, evidenziando i vantaggi dei metodi basati sull’integrazione di diversi dati (Leuenberger et al. 2018, Colak & Sunar 2020, CIMA 2024).

L’indice di rischio sviluppato, che considera sia la pericolosità che la vulnerabilità, ha individuato, valutato e ponderato i principali fattori predisponenti gli incendi boschivi, quali i fattori vegetazionali (copertura del suolo), i fattori climatici, i fattori morfologici, e i fattori socioeconomici, così da ottenere una mappa di sintesi che suddivide il territorio regionale in classi a rischio crescente (con dettaglio sub-comunale), così come richiesto dalla Comunità Europea (Rodrigues et al. 2022).

Peraltro, la creazione di sottoindici e indici richiede la scelta di un metodo di combinazione dei vari fattori (Chuvieco 2003).

La creazione di sottoindici e indici richiede la scelta di un metodo di combinazione dei vari fattori (Chuvieco 2003).

Implementazione dell’indice di rischio globale

Lo sviluppo di modelli di rischio dovrebbe essere il risultato di un’integrazione tra diversi componenti interconnessi tra loro e con il fenomeno degli incendi (Chuvieco et al. 2014, Xi et al. 2019), così da fornire un quadro generale sulle probabilità di incendio e delle conseguenze da esso causate (Dunn et al. 2020). Proprio in virtù di queste esigenze, all’interno del Piano triennale di previsione, prevenzione e lotta attiva contro gli incendi 2023-2025 è stata sviluppata una nuova metodologia per il calcolo della zonizzazione del rischio statico definiti attraverso un Indice di Rischio Globale (IRG) ideato e sviluppato partendo dalle linee guida della Protezione Civile sul rischio incendio (Protezione Civile Regione Puglia 2023).

La modellazione del rischio incendio è uno strumento a supporto dei piani di protezione civile e delle strategie di gestione del combustibile per ridurre le conseguenze degli incendi. Le analisi del rischio e della vulnerabilità sono obbligatorie per la pianificazione territoriale e per i pro-

grammi di riduzione del rischio ai diversi livelli amministrativi. Di recente sono state sviluppate diverse tecniche che utilizzano approcci integrati GIS e/o modelli complessi (D’Este et al. 2020) sulla base di diverse variabili fisiche. Inoltre, sono stati utilizzati approcci fisico/statistici e stocastici/causali, evidenziando i vantaggi dei metodi basati sull’integrazione di diversi dati (Leuenberger et al. 2018, Colak & Sunar 2020, CIMA 2024).

L’indice di rischio sviluppato, che considera sia la pericolosità che la vulnerabilità, ha individuato, valutato e ponderato i principali fattori predisponenti gli incendi boschivi, quali i fattori vegetazionali (copertura del suolo), i fattori climatici, i fattori morfologici, e i fattori socioeconomici, così da ottenere una mappa di sintesi che suddivide il territorio regionale in classi a rischio crescente (con dettaglio sub-comunale), così come richiesto dalla Comunità Europea (Rodrigues et al. 2022).

Peraltro, la creazione di sottoindici e indici richiede la scelta di un metodo di combinazione dei vari fattori (Chuvieco 2003). Il modello adottato in questo studio si basa su una significativa reinterpretazione dell’approccio proposto da Chuvieco & Congalton (1989), applicato per la prima volta in Spagna e successivamente utilizzato in altri territori. Pertanto, il metodo di modellazione del pericolo di incendio qui sviluppato si basa su un modello additivo ponderato in cui la procedura utilizzata è simile a quella di una tipica analisi multicriteriale (MCA – Chuvieco 2003, Barredo 1996, Vadrevu et al. 2010, Vicente López & Crespo Abril 2012). L’obiettivo viene raggiunto combinando linearmente i fattori utilizzati e assegnando loro un peso. In particolare, ogni variabile in esame è stata elaborata considerando il loro peso in base al grado di pericolosità che rappresenta. Infine, la combinazione di diversi strati/indici fornisce una mappa di pericolo integrata, secondo i criteri stabiliti dal modello. La valutazione dei pesi assegnati a ciascuna variabile è ottenuta mediante la procedura di normalizzazione da 0 a 1 (Saaty 1990, 2000). Come sottolineato da diversi autori (Chuvieco & Congalton 1989, Chuvieco 2003) i pesi assegnati tendono a tenere conto dell’importanza relativa di ciascuna variabile in termini di aumento del pericolo di incendio, anche se, in linea di principio, si tratta di un sistema di pesi arbitrario. Ogni fattore è suddiviso in diversi livelli in base al suo impatto sull’aumento del pericolo di incendio.

In considerazione del numero di indici e sottoindici sviluppati in questo lavoro, è stato realizzato un workflow esplicativo dell’analisi multicriteriale messa in atto (Fig. 2). Tutti i dataset sono in parte stati messi a disposizione dalla Regione Puglia, mentre altri sono stati liberamente scaricati online. Tutte le operazioni spaziali sono state eseguite attraverso l’utilizzo del software QGIS.

Risultati

Indici di pericolo

Nella prima parte del metodo adottato sono stati calcolati gli indici che riguardano il pericolo, il quale può essere definito come un fenomeno, una situazione, un’attività umana o una condizione che può causare la perdita di vite umane, lesioni o altri impatti sulla salute, danni alla proprietà, perdita di mezzi di sussistenza e di servizi, disagi sociali ed economici o danni. Questa definizione si rifà al

Tab. 2 - Assegnazione dei valori di IPV sulla base dell’intensità lineare di fiamma (Kw m⁻¹) di ogni modello di combustibile. I modelli sono stati tabulati in ordine crescente rispetto ai valori di intensità lineare di fiamma così come definiti dalla Mappa dei modelli di Combustibili fornita realizzata dalla Regione Puglia.

Modello	Punteggio IPV
8	0.004
9	0.0048
1	0.035
2	0.08
7	0.3
5	0.4
4	0.6
6	0.7
3	1

Decreto legislativo n.81/08 Codice della salute e della sicurezza sul lavoro, che inserisce all'art. 2 (lettera s ed r) proprio la definizione di pericolo.

Gli indici di pericolo computati sono quello vegetazionale (IPV), storico (IPS), climatico (IPC), morfologico (IPM) e antropico (IPA – vedi Fig. S2 nel Materiale supplementare). La loro somma pesata fornisce l'indice di pericolo globale (IPG).

L'IPV è stato realizzato partendo dalla mappa dei combustibili forniti dalla Regione Puglia. A ogni modello di combustibile viene attribuito un valore numerico di pericolosità in relazione alle caratteristiche pirolitiche che determinano il comportamento del fuoco durante un incendio (Lasaponara & Lanorte 2007). A questo riguardo, sono state analizzate le curve di intensità lineare di fiamma ($Kw\ m^{-1}$) relative a ogni modello di combustibile e sono poi state riportate nel *dataset* fornito dalla Regione Puglia (Tab. 2).

Per il calcolo del pericolo storico (IPS) è stata elaborata una mappa degli eventi d'incendio (Martínez et al. 2013, Rodrigues et al. 2014) per il periodo 2000-2021, partendo dalle schede AIB fornite dalla Regione Puglia. Gli eventi puntuali sono stati spazializzati grazie alle coordinate riportate. Questo *dataset* è servito da *input* per la successiva *Kernel Density Estimation* (KDE) con un raggio di 5 km e utilizzando come peso il parametro degli ettari boscati incendiati indicato per ogni evento.

Un altro indice di pericolo utilizzato è quello climatico (IPC). L'elaborazione dell'indice è stata ottenuta dall'integrazione di dati storici sintetici di temperatura, precipitazione e umidità relativa calcolati per le stazioni meteo del centro funzionale della Regione Puglia. I dati relativi alle medie delle temperature massime, alle medie delle precipitazioni e la media dell'umidità relativa (Fig. S3) sono stati elaborati attraverso un modello matematico per un arco temporale variabile in base alle disponibilità dei dati per ogni stazione, così come forniti dal Centro Funzionale della Regione Puglia.

Nel caso specifico, la parte strutturale di temperatura e pioggia è essenzialmente legata all'altitudine, a causa della limitata variazione latitudinale e longitudinale del territorio regionale, mentre l'umidità non mostra particolari dipendenze sistematiche. La componente stocastica tiene conto delle fluttuazioni a scala locale ed è stata interpolata in ciascun punto della mappa mediante *kriging* ordinario, effettuando le stime attraverso un'interpolazione dei valori osservati che pesa il contributo di ciascuna osservazione con la distanza dal punto di stima. Questa operazione ha permesso di elaborare dei *raster* di temperatura, precipitazione e umidità relativa normalizzati. Infine, i parametri sono stati combinati assegnando un peso diverso a ciascuna variabile climatica. In particolare, è stato assegnato un peso maggiore all'umidità e poi alle precipitazioni e infine alla temperatura, in considerazione dell'influenza che questi fattori hanno sulla propagazione dell'incendio (Baines 1990).

La formula utilizzata per calcolare l'IPC è la seguente (eqn. 1):

$$IPC = U \cdot 0.45 + P \cdot 0.35 + T \cdot 0.2 \quad (1)$$

dove U è l'umidità, P sono le precipitazioni e T è la temperatura. Il modello utilizzato combina due approcci: (i) deterministico, che tiene conto delle caratteristiche geografiche del territorio, come l'altitudine; ad esempio, la temperatura e le precipitazioni tendono a diminuire con l'aumentare dell'altitudine; (ii) stocastico, che considera le variazioni climatiche casuali e locali che non possono essere completamente spiegate dai fattori geografici.

In sintesi, l'IPC è calcolato combinando informazioni precise (come l'altitudine) con stime statistiche basate sui

dati delle stazioni meteorologiche. Questo approccio permette di ottenere una rappresentazione accurata e dettagliata del rischio climatico su tutto il territorio pugliese.

Per il calcolo dell'IPA (Clarke et al. 2019, Gholamnia et al. 2020 – vedi Fig. S4 nel Materiale supplementare) sono state invece elaborate 3 componenti basate sulla densità a livello di territorio comunale di strade principali e linee ferroviarie (indice di densità strade e ferrovie – $IDSf$), zone agricole (indice di densità agricola – IDA) e aree di interfaccia urbano-foresta o urbano-rurale (indice di densità urbana – IDu). L'IPA è stato calcolato utilizzando la seguente formula (eqn. 2):

$$IPA = IDSf + IDA + IDu \quad (2)$$

L' $IDSf$ è stato calcolato prendendo in considerazione le strade e le ferrovie derivate dal *layer* vettoriale estratto da *OpenStreetMap* su una griglia di riferimento di 10×10 km e calcolando il rapporto (assumendo una larghezza stradale uniforme pari a 10 m) tra la superficie occupata dalle strade (ottenuta per ogni cella della griglia) e l'area della singola cella. L' IDA è stato ottenuto dal rapporto tra la copertura agricola di ogni cella e l'area della singola cella. La copertura agricola è stata calcolata a partire dalle classi della Carta della Natura della Regione Puglia (ISPRA 2013), selezionando quelle a uso agricolo. Infine, l' IDu è stato calcolato come rapporto tra la somma delle aree di interfaccia urbana/rurale (definite da un *buffer* di 50 metri sulla linea perimetrale degli aggregati urbani di ogni cella) e l'area della singola cella.

L'ultimo sottoindice (IPM) deriva dalla combinazione dei due elementi topografici più rilevanti per la valutazione del pericolo di incendio: la pendenza e l'esposizione. La pendenza influenza la capacità di preriscaldamento del combustibile, accelerando il processo di combustione e quindi la velocità di propagazione dell'incendio (Rothermel 1983, Kushla & Ripple 1997). L'esposizione influenza l'irraggiamento e la direzione del vento, e quindi la temperatura e l'umidità. La pendenza e l'esposizione sono state ricavate da un modello digitale di elevazione (DEM) con una risoluzione spaziale di 20 metri. L'intervallo dei valori reali di pendenza ed esposizione è stato standardizzato nell'intervallo di valori 0-1 (basso pericolo-alto pericolo). Per quanto riguarda la pendenza, i valori normalizzati crescono all'aumentare del valore reale, mentre i valori normalizzati dell'esposizione crescono secondo il seguente ordine: NW-NE, E-NE, W-NW, E-SE, W-SW, SE-SW. L'indice di pericolosità morfologica (IPM) è stato calcolato tramite la seguente formula (eqn. 3):

$$IPM = Pz \cdot 0.52 + Esp \cdot 0.48 \quad (3)$$

dove Pz è la pendenza e Esp l'esposizione. Il peso relativo di ciascun parametro è stato attribuito sulla base del calcolo del coefficiente di correlazione di Pearson tra il *dataset* degli incendi reali avvenuti nel periodo 2000-2021 e la pendenza, e successivamente tra lo stesso *dataset* e l'esposizione. Da questa analisi è emerso che la pendenza è maggiormente correlata (anche se di poco) agli incendi rispetto all'esposizione, per cui il peso relativo è risultato maggiore per il primo fattore (0.52 vs. 0.48).

Infine, i 5 sottoindici descritti sopra sono stati pesati e sommati al fine di ottenere l'Indice di Pericolo Globale (IPG), che successivamente è stato normalizzato con valori da 0 a 1. La formula per il calcolo dell'IPG è la seguente (eqn. 4):

$$IPG = IPV \cdot 0.387 + IPS \cdot 0.242 + IPC \cdot 0.124 + IPA \cdot 0.124 + IPM \cdot 0.124 \quad (4)$$

In questo caso, i pesi sono stati attribuiti attraverso una

comparazione tra pari (*Pairwise Comparison*) su una matrice che utilizza come riferimento la scala di Saaty (1990, 2000). La matrice risultante viene poi utilizzata per calcolare i pesi relativi di ciascun elemento, aiutando a determinare le priorità complessive (vedi Fig. S5 in Materiale supplementare).

Indici di vulnerabilità

La vulnerabilità, ovvero le caratteristiche di un sistema o di un bene che lo rendono suscettibile agli effetti dannosi di un pericolo, considera i danni potenziali del fuoco, siano essi di tipo ecologico e quindi legati al comportamento del fuoco e alle caratteristiche dell'ecosistema, che economici e quindi legati anche al valore di beni e risorse interessati dal passaggio del fronte di fiamma (Papathoma-Köhle et al. 2022). Il calcolo dell'indice di vulnerabilità agli incendi boschivi (*IVB*) prende in considerazione e somma differenti aspetti, ognuno dei quali viene valutato da un apposito sottoindice: indice delle caratteristiche dell'incendio (*ICI*), indice di vulnerabilità specifica (*IVS*) e indice dei valori delle risorse (*IVR*).

L'*ICI* fornisce una stima del grado di danno che un incendio può determinare agli elementi esposti (suolo e vegetazione), indipendentemente dalle caratteristiche di tali elementi. Seguendo un approccio sintetico che tiene conto solo di parametri statici, si propone il calcolo di *ICI* sulla base della somma di 3 sottoindici: (i) l'indice di pericolo vegetazionale (*IPV*); (ii) l'indice di pericolo morfologico (*IPM*); (iii) l'indice di superficie percorsa dal fuoco (*ISPF*).

La mappa dell'*ISPF* (Fig. S6) rappresenta l'estensione e il numero degli incendi avvenuti in passato all'interno di ciascun pixel. Il dato di riferimento è contenuto nelle perimetrazioni degli incendi e nelle schede AIB dal 2012 al 2021 elaborate dai Carabinieri Forestali.

Il risultato finale della somma pesata di questi 3 sottoindici è appunto l'*ICI* (Fig. S7) che riassume l'informazione riguardo al danno che l'incendio potrebbe arrecare senza considerare le caratteristiche specifiche (eqn. 5):

$$ICI = IPV \cdot 0.45 + IPM \cdot 0.20 + ISPF \cdot 0.35 \quad (5)$$

L'indice *IVS* (Fig. S9) stima la capacità potenziale di un ecosistema di assorbire le perturbazioni arrecate da un incendio con determinate caratteristiche. La vegetazione può assorbire il fattore di disturbo sia passivamente (resistenza) sia attraverso la ricostituzione post-incendio (resilienza). La vulnerabilità specifica è il valore sintetico della capacità di resistenza e resilienza. Sulla base delle tipologie vegetazionali della Carta delle categorie forestali della Regione Puglia, è stato attribuito un valore di resistenza e uno di resilienza a ciascuna categoria vegetazionale. Per entrambi i parametri, i valori attribuiti vanno da 1 a 5, dove 5 rappresenta la massima resistenza e resilienza. Dunque, in entrambi i casi a valore elevato corrisponde un basso grado di vulnerabilità. Conseguentemente la vulnerabilità specifica è stata calcolata come (eqn. 6):

$$Vs = 1 - \left[\frac{Rs \cdot Rl}{25} \right] \quad (6)$$

dove *Vs* è la vulnerabilità specifica (che può assumere un valore tra 0 e 0.96), *Rs* la resistenza, *Rl* la resilienza. I valori di *Rs* e *Rl* attribuiti sono quelli riportati in Tab. 3 (Dimitrakopoulos & Panov 2001, Popović et al. 2021).

Un altro sottoindice complesso che concorre alla vulnerabilità agli incendi boschivi è rappresentato dall'*IVR* (Fig. S9). Questo sottoindice esprime il danno e/o le variazioni negative potenziali che gli incendi causano agli elementi naturali con i quali interagiscono ed è dato dalla somma pesata e successivamente normalizzata di *IVA* (Indice del valore ambientale), *IVP* (Indice del valore protettivo), *IVE* (Indice del valore economico) e *IVV* (Indice di vulnerabilità di viabilità).

Per il calcolo dell'*IVA* si utilizzano due indicatori contenuti nel dataset della Carta della Natura della Regione Puglia (ISPRA 2013). Il primo è l'indice del Valore Ecologico (inteso come pregio naturalistico) che fornisce una mappa in cui vengono evidenziate le aree in cui sono presenti aspetti peculiari di naturalità del territorio. I valori attribuiti all'indice del valore ecologico variano da 1 (valore ecologico molto basso) a 5 (valore ecologico molto alto).

Il secondo sottoindice è l'indice di Fragilità Ambientale che rappresenta lo stato di vulnerabilità del territorio dal punto di vista della conservazione dell'ambiente naturale, ed è il risultato della combinazione degli indici di sensibilità ecologica e di pressione antropica, considerando la sensibilità ecologica come la predisposizione intrinseca di ogni singolo biotopo al rischio di degradazione e la pressione antropica come il disturbo su di esso provocato dalle attività umane. I valori attribuiti all'indice di fragilità ambientale variano da 1 (fragilità ambientale molto bassa) a 5 (fragilità ambientale molto alta). I due sottoindici vengono sommati attribuendo pesi a ciascuno di essi per ottenere l'indice di valore ambientale (*IVA*).

L'*IVP* è sviluppato sulla base della mappa regionale del vincolo idrogeologico. Si tratta una mappa binaria (classi 0-1) che identifica l'assenza (0) o presenza (1) del vincolo idrogeologico come da Piano Paesaggistico della Regione Puglia. Il valore economico (*IVE*) è espresso attribuendo un punteggio alle tipologie vegetazionali comprese nella carta delle tipologie forestali della Regione Puglia coerente con la loro funzione economica diretta (Tab. 4).

Tab. 3 - Punteggi di Resistenza (*Rs*) e Resilienza (*Rl*) per ogni tipologia forestale.

Categoria	Codice	Resistenza (<i>Rs</i>)	Resilienza (<i>Rl</i>)
Pioppeti artificiali	2240	4	4
Piantagioni altre latifoglie	2241	2	4
Piantagioni conifere	2242	2	2
Boschi di rovere, roverella e farnia	3110	2	4
Boschi di cerro, di farnetto, fragno, vallonea	3111	3	4
Ostrieti, carpineti	3112	3	3
Castagneti	3113	4	4
Faggete	3114	4	3
Boschi igrofilii	3115	4	2
Altri boschi caducifogli	3116	3	3
Leccete	3117	3	4
Sugherete	3118	5	4
Pinete di pini mediterranee	3120	2	4
Pinete di pino nero, pino laricio e pino loricato	3121	2	4
Altri boschi di conifere	3122	2	4
Pascoli alberati	3140	1	4
Aree a Pascolo naturale, praterie, incolti	321	1	5
Arbusteti di clima temperato	322	3	4
Macchia, arbusteti mediterranei	323	3	4
Altri boschi di latifoglie sempreverdi	3119	3	4

Infine l'IVV, esprime il danno potenziale da incendi di vegetazione per le infrastrutture e per gli utenti che percorrono la viabilità del territorio comunale. Si assume *a priori* che la vulnerabilità della viabilità agli incendi cresce in relazione al numero di utenti. Pertanto, utilizzando un *layer* che considera la classificazione della viabilità forestale, rete stradale e ferroviaria della Regione Puglia, in base a caratteristiche di tipo fisico e giuridico, caratterizzando ciascuna tipologia stradale per mezzo dell'utilizzo di attributi specifici, è stato attribuito un valore di vulnerabilità a ogni tipologia in base al livello gerarchico (stabilito in relazione all'utenza). Per ogni elemento lineare viene determinata un'area *buffer* di 50 metri.

Inoltre, l'indice di vulnerabilità dell'interfaccia (IVI – Aguirre et al. 2024) considera anche la zona di interfaccia. L'interfaccia urbano-rurale è una zona particolarmente vulnerabile per la presenza di edifici e loro pertinenze, infrastrutture e persone. Gli insediamenti risultano particolarmente vulnerabili laddove la vegetazione si avvicina all'edificio sino a lambirlo. Per la mappatura della vulnerabilità agli incendi di interfaccia, sono stati individuati gli elementi esposti all'interno della fascia di interfaccia. A ciascuno di essi è stato assegnato un valore di sensibilità compreso tra 1 e 10, secondo i riferimenti e le tabelle del manuale operativo della Protezione Civile (2007) e delle Linee Guida Regionali della Regione Puglia (Protezione Civile 2019). La vulnerabilità complessiva di un'area è stata calcolata come somma dei prodotti tra il numero di elementi esposti per ciascuna classe di sensibilità e il corrispondente valore di sensibilità.

L'IVI, insieme all'IVB, determina uno dei due indici sintetici principali ovvero l'Indice della vulnerabilità globale agli incendi IVG (Fig. S10). La mappa dell'IVG (Fig. 3) è il risultato della combinazione della mappa IVB e della mappa IVI

Tab. 4 - Indice del valore economico attribuito a ogni tipologia forestale.

Categoria	Codice	Valore economico
Pioppeti artificiali	2240	2
Piantagioni di altre latifoglie	2241	2
Piantagioni di conifere	2242	2
Boschi di rovere, roverella e farnia	3110	5
Boschi di cerro, di farnetto, fragno, vallonea	3111	5
Ostrieti, carpineti	3112	4
Castagneti	3113	3
Faggete	3114	3
Boschi igrofilo	3115	2
Altri boschi caducifogli	3116	3
Leccete	3117	4
Sugherete	3118	2
Pinete di pini mediterranee	3120	4
Pinete di pino nero, pino laricio e pino loricato	3121	3
Altri boschi di conifere, pure o miste	3122	3
Pascoli alberati	3140	3
Aree a pascolo naturale, praterie, incolti	321	2
Arbusteti di clima temperato	322	3
Macchia, arbusteti mediterranei	323	3
Altri boschi di latifoglie sempreverdi	3119	4

(IVI e IVB sono relative ad aree che non si intersecano).

Indici di rischio

La fase finale di questo approccio è rappresentata dal calcolo dei diversi indici di rischio ottenuti dalla somma di alcuni sottoindici calcolati in precedenza. È stata così generata una mappa del rischio di incendio globale (IRG) che tiene conto dell'effetto combinato del pericolo e della vulnerabilità. È stato quindi calcolato un indice aggregato del rischio, che assegna la priorità al rischio per le vite umane, e che considera anche gli aspetti ecologici e socioeconomici.

Il primo indice è quello di Rischio incendi boschivi (IRB) che deriva dal prodotto dei 2 indici IPG e IVB (Fig. S11). Il

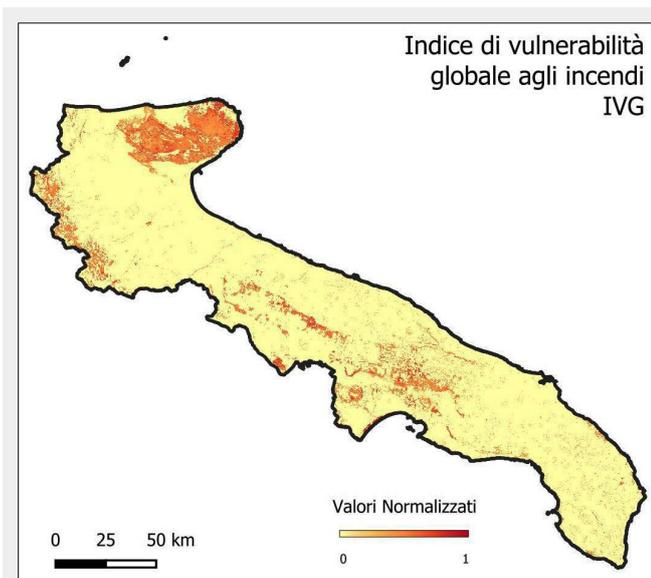


Fig. 3 - Mappa dell'Indice di Vulnerabilità Globale (IVG).

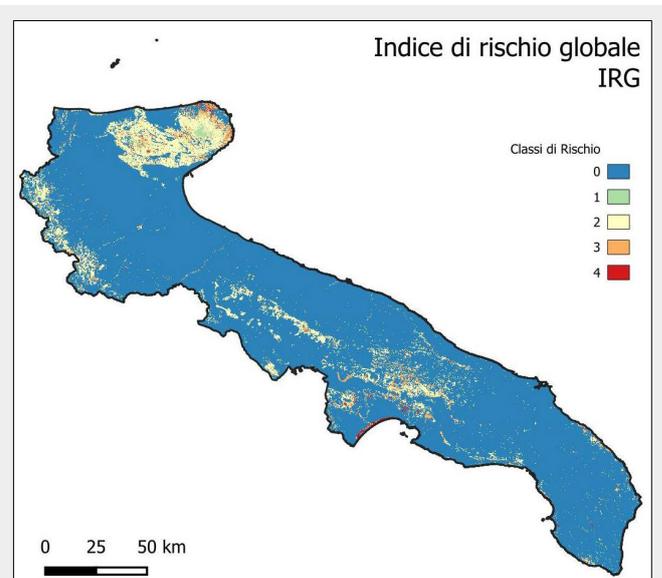
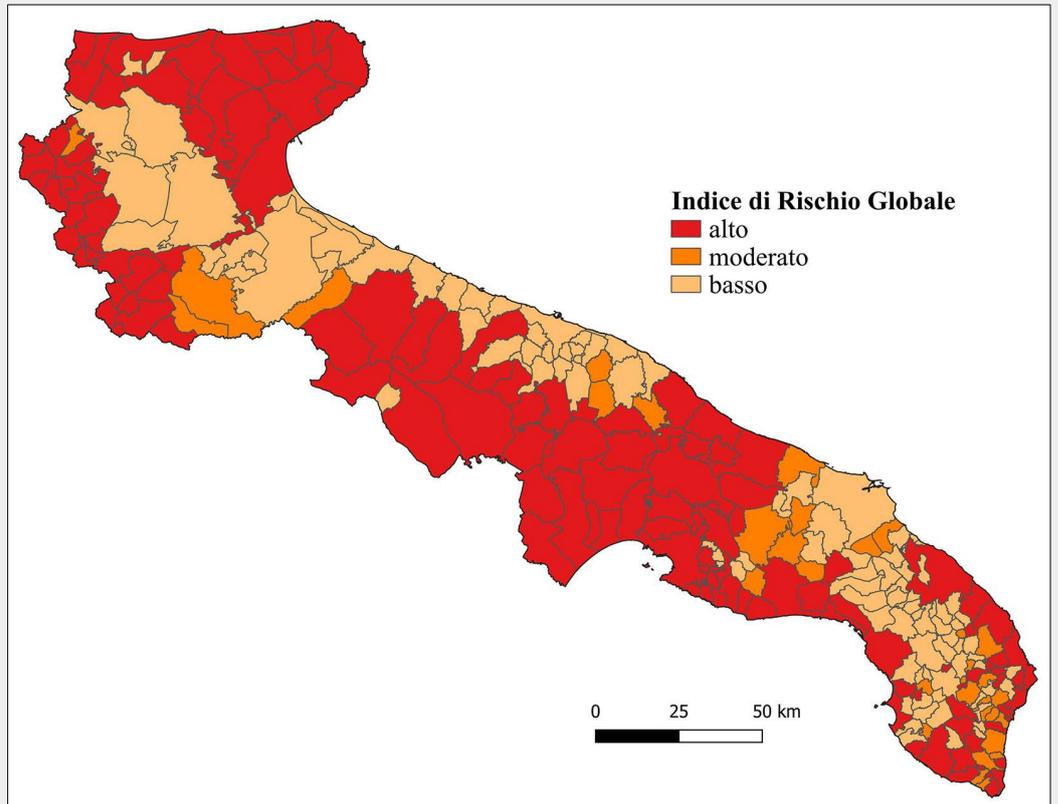


Fig. 4 - Mappa finale dell'Indice di Rischio Globale (IRG).

Fig. 5 - Mappa finale dell'Indice di Rischio Globale (IRG) con aggregazione a scala comunale.



Rischio incendi d'interfaccia (IRI), invece, è il prodotto tra IPG e IVI (Fig.S12).

L'indice di rischio globale (IRG) rappresenta il risultato finale di questa metodologia ed è dato dall'unione dei due indici di rischio precedenti (IRI e IRB - Fig. 4). La classificazione dell'IRG (Fig. S12) è definita assegnando un valore dell'indice normalizzato a ogni pixel. Questi valori sono suddivisi in cinque classi [$i = 0, 1, 2, 3, 4$]. Si precisa che tutte le aree con rischio diverso da 0 corrispondono a quelle a cui è stato assegnato un modello di combustibile dalla Carta dei Modelli di Combustibile (Fig. 1) fornita dalla Regione Puglia.

Aggregazione a scala comunale

Ai fini pratici e di pianificazione AIB, l'Indice di Rischio Globale necessita di essere aggregato a livello di ambito amministrativo (Fig. S12) così da poter classificare i territori comunali e assegnare le priorità agli interventi di prevenzione e protezione. A livello spaziale, i valori di pericolosità, descritti nella loro distribuzione continua sul territorio regionale sotto forma di pixel, sono stati sintetizzati e aggregati per i diversi comuni utilizzando la media ponderata. Per ogni territorio comunale è stata calcolata l'area delle classi di rischio IRG presenti. Considerando quindi il valore della classe e l'area di ognuna di esse presente in ciascun territorio comunale, è stata calcolata la media ponderata (M_p - eqn. 7):

$$M_p = \frac{\sum (A_i / aC) \cdot IRG_i}{IRG_{tot}} \quad (7)$$

dove A_i è l'area della i -esima classe [$i = 1, 2, 3, 4$], A_c è l'area del territorio comunale, IRG_i è la classe di rischio e IRG_{tot} è la somma dei valori delle classi di IRG presenti per ogni comune. In questo modo, la classe assume un valore crescente da 1 a 4, direttamente proporzionale alla sua estensione territoriale all'interno del Comune. Suddividendo il dataset in quartili in base al valore mediano dell'Indice di Rischio Globale (IRG), sono state ottenute

quattro classi: A e B (inferiori alla mediana) e C e D (superiori). Successivamente, sono state raggruppate le classi A e o IRG nella categoria "basso rischio", la classe B in quella "rischio moderato" e le classi C e D nella categoria "alto rischio" (Fig. 5).

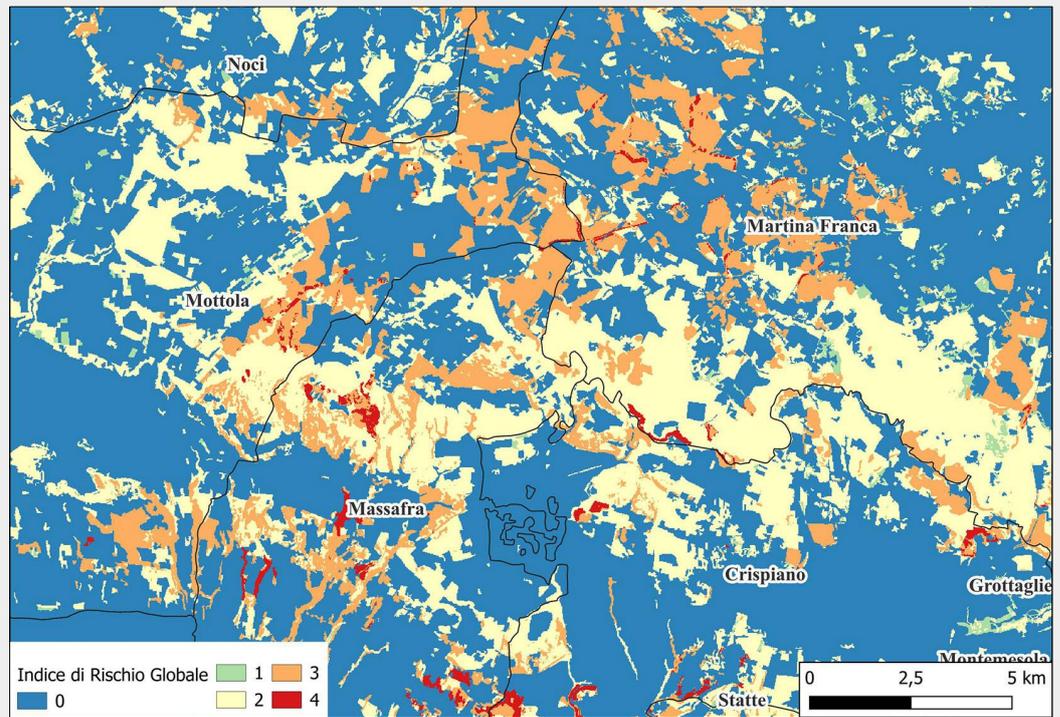
Discussione

In Italia, a livello di pianificazione antincendi boschivi, le cartografie di rischio statico che in genere vengono prodotte non sono integrate con gli altri aspetti della gestione territoriale, sia per una mancanza di riconoscimento normativo, sia perché spesso le informazioni non sono esaustive oppure non sono calate all'interno del contesto locale. Le Regioni, attraverso i Piani triennali AIB, in alcuni casi forniscono diverse cartografie del rischio statico a elevato grado informativo e di dettaglio. Le metodologie utilizzate per la loro elaborazione sono differenti e spesso vengono proposte delle modifiche rispetto a quanto indicato nelle linee guida nazionali. Nel presente lavoro è stata sviluppata la metodologia descritta con lo scopo di fornire uno strumento innovativo per la gestione del rischio. Ciò permette di avere dati utilizzabili in diverse modalità al fine di ottenere la valutazione del rischio, sia puntualmente sul territorio che in modo aggregato a livello comunale. Il risultato finale di questo lavoro è stato inserito all'interno del Piano AIB della Regione Puglia 2023-2025.

Attraverso l'uso della mappa del rischio globale (Fig. S12) è stato possibile assegnare un indice di rischio a ogni comune della Puglia. Dall'analisi è emerso (Tab. 5) che poco meno della metà dei Comuni della Puglia (49%) presenta un rischio alto. Sommando questi ultimi ai 32 comuni che presentano rischio moderato, si raggiunge il 61% del territorio regionale con rischio medio-alto.

La valutazione del rischio a livello comunale è quella comunemente presente all'interno delle Linee Guida e che spesso viene inserita nei Piani triennali AIB. Peraltro, la peculiarità della metodologia utilizzata in questo lavoro riguarda la possibilità, attraverso gli output del modello utilizzato, di ottenere valutazioni a scala territoriale e non

Fig. 6 - Estratto della mappa dell'Indice di Rischio Globale (IRG) per alcuni comuni della Regione Puglia.



solo rispetto agli ambiti amministrativi. Infatti, l'indice di rischio si basa su dati *raster*, e le classi di rischio sono espresse a livello di singolo pixel per cui, a livello di pianificazione e supporto ai decisori pubblici, è possibile localizzare precisamente quali sono le aree da sottoporre a particolare attenzione all'interno del Comune al fine di intraprendere azioni preventive più mirate e quindi più efficaci. Vista la valenza pratica, i prodotti di questo studio sono stati inseriti all'interno del Piano regionale di previsione, prevenzione e lotta attiva contro gli incendi boschivi 2023-2025 (Protezione Civile Regione Puglia 2023). Se ne riportano alcuni esempi in Fig. 6.

L'uso della metodologia sopra descritta permette una maggiore discriminazione delle aree a maggiore rischio e quale fattore concorre maggiormente ad aumentarlo, dal momento che ogni indice e sottoindice è costruito per poter essere utilizzato anche indipendentemente rispetto agli indici aggregati. Le suddette caratteristiche costituiscono uno dei caratteri innovativi della metodologia, offrendo così un miglior supporto all'azione decisionale della Protezione Civile, a differenza di quanto è avvenuto nella pianificazione implementata in passato. Inoltre, la differenziazione e il calcolo della pericolosità e vulnerabilità in maniera separata e indipendente permette di dare maggiore importanza a quest'ultima, in ragione del fatto che la Puglia è una regione molto antropizzata anche nelle aree rurali.

Infine, visto che il modello è stato realizzato in ambiente GIS *open source* con molti dati aperti o disponibili presso gli uffici regionali, la carta del rischio è facilmente aggiornabile ogni qual volta si renda necessario modificare un

fattore o aggiungerne un altro. Infatti, il software utilizzato (QGIS) permette di implementare un modello spaziale attraverso un processo semi-automatizzato che rende l'aggiornamento più semplice e rapido. Inoltre, attraverso la sempre maggiore disponibilità di dati telerilevati e di tecniche di *machine learning* sempre più innovative, i *dataset* dei diversi fattori possono essere integrati in maniera più precisa e aggiornata (D'Este et al. 2021).

Ovviamente, considerata la valenza scientifica del progetto, il modello è stato validato in modo tale da avere anche un riscontro statistico di quanto elaborato. Il processo di validazione è avvenuto selezionando in maniera causale il 40% degli incendi avvenuti tra il 2000 e il 2021 e verificando la classe IRG assegnata a ciascun incendio (Tab. 6). Sulla base della verifica condotta, risulta che oltre la metà degli incendi sono stati classificati nelle classi di rischio 2 e 4, e che il numero di incendi per km² aumenta progressivamente passando dalla classe 1 alla classe 4, con quest'ultima che presenta il valore più elevato (2.11). Tale risultato riflette l'affidabilità del metodo nell'individuazione delle aree a maggior rischio. Naturalmente, la metodologia proposta ha margini di miglioramento, soprattutto per quanto riguarda l'assegnazione dei pesi ai vari fattori nel calcolo di alcuni indici, che è un processo complesso che meriterebbe un maggiore approfondimento. Comunque, considerando le esigenze tecniche del piano, l'assegnazione dei pesi ai vari fattori nel calcolo degli

Tab. 5 - Numero e percentuali di comuni per ogni classi di rischio IRG.

Classe IRG	n	%
Rischio Basso	99	38.5
Rischio Moderato	32	12.5
Rischio Alto	126	49.0
Totale	257	100

Tab. 6 - Conteggio del numero degli incendi del periodo 2000-2021 e relativa percentuale per ogni classe di rischio IRG. Inoltre è riportato anche il numero di incendi per km² di ogni classe di rischio.

Classe IRG	Superficie (Km ²)	Num. Incendi	% Incendi	Incendi km ⁻²
1	160.92	114	3.62	0.71
2	1770.58	2023	64.24	1.14
3	471.11	844	26.80	1.79
4	79.63	168	5.34	2.11

indici si è basata sulle relazioni riportate in letteratura scientifica tra i diversi fattori e il rischio incendio. L'attribuzione di un valore numerico ai pesi è scaturita da una consultazione tra tecnici e ricercatori mirata a identificare la maggiore o minore importanza di un fattore rispetto a un altro. Per il confronto tra i fattori ci si è basati sulla *pairwise comparison* (confronto a coppie) la quale è una tecnica utilizzata per valutare e confrontare una serie di alternative o criteri due a due. Questa metodologia è particolarmente utile in contesti decisionali complessi, dove è necessario stabilire priorità tra diverse opzioni.

L'approccio utilizzato in questo studio è stato applicato a scala regionale, per cui sarà necessario in futuro effettuare delle valutazioni a scala locale per individuare in maniera più precisa ogni singolo punteggio da attribuire ai diversi indici.

Infine, va evidenziato che nella stima della vulnerabilità, è stato considerato solo il parametro "sensibilità" e non "incendiabilità" e "vie di fuga" per mancanza di dati.

Conclusioni

Il problema degli incendi boschivi sta diventando sempre più acuto anche in contesti territoriali in precedenza scarsamente interessati dal fenomeno, a causa soprattutto delle continue trasformazioni del territorio e dei cambiamenti climatici. Ciò ha determinato un aumento degli incendi e una maggior impatto sulle popolazioni e sugli habitat naturali. Visto il contesto e le necessità sia del mondo accademico che dei Dipartimenti di Protezione Civile, si stanno sviluppando tecniche sempre più innovative per la valutazione del rischio incendio che possano meglio indirizzare i decisori pubblici nelle attività di programmazione e prevenzione/mitigazione del rischio. L'indice di rischio globale sviluppato in questo studio ha introdotto alcune modifiche rispetto a quanto proposto nelle Linee guida nazionali e regionali, tenendo conto di alcuni aspetti innovativi sia nell'approccio GIS utilizzato sia nelle modalità di analisi di alcuni parametri che determinano il pericolo e soprattutto la vulnerabilità.

Ringraziamenti

Questo lavoro è stato realizzato sulla base dei risultati del Progetto PRIP (Piano Regionale Incendi Puglia) - Accordo ai sensi dell'art.15, legge 7 agosto 1990, n. 241 e D. Lgs 2 gennaio 2018, n. 1 tra la Regione Puglia e il Consiglio Nazionale delle Ricerche - Istituto di Metodologie per l'Analisi Ambientale per attività di Redazione del Piano Regionale Antincendio Boschivo

Bibliografia

- Aguirre P, León J, González-Mathiesen C, Román R, Penas M, Ogueda A (2024). Modelling the vulnerability of urban settings to wildland-urban interface fires in Chile. *Nat. Hazards Earth Syst.* 24: 1521-1537. - doi: [10.5194/nhess-24-1521-2024](https://doi.org/10.5194/nhess-24-1521-2024)
- Alasli M (2019). Static risk mapping of forest fires in the case of the Province of Chefchaouen (Morocco). *Proceedings of the International Cartographic Association* 2: 2. - doi: [10.5194/ica-proc-2-2-2019](https://doi.org/10.5194/ica-proc-2-2-2019)
- Baines PG (1990). Physical mechanisms for the propagation of surface fires. *Mathematical and Computer Modelling* 13 (12): 83-94. - doi: [10.1016/0895-7177\(90\)90102-5](https://doi.org/10.1016/0895-7177(90)90102-5)
- Barredo JI (1996). Sistemas de informacion geografica y evaluacion multicriterio en la ordenacion del territorio. Ra-Ma, Madrid, Spain.
- Boenzi F, Caldara M (1990). Appunti sul paesaggio carsico pugliese. *Itinerari Speleologici* 4: 17-30.
- Chuvieco E, Congalton RG (1989). Application of remote sensing and geographic information systems to forest fire hazard mapping. *Remote Sensing of Environment* 29 (2): 147-159. - doi: [10.1016/0034-4257\(89\)90023-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(89)90023-0)
- Chuvieco E (2003). Wildland fire danger estimation and map-

- ping: the role of remote sensing. World Scientific Publishing Co. Pty Ltd, Singapore.
- Chuvieco E, Aguado I, Jurdao S, Pettinari ML, Yebra M, Salas J, Hantson S, De la Riva J, Ibarra P, Rodrigues M, Echeverría M, Azqueta D, Román MV, Bastarrrika A, Martínez S, Recondo C, Zapico E, Martínez-Vega FJ (2014). Integrating geospatial information into fire risk assessment. *International Journal of Wildland Fire* 23: 606-619. - doi: [10.1071/WF12052](https://doi.org/10.1071/WF12052)
- CIMA (2024). IPA Impaginazione FIRE Completo. CIMA Research Foundation, website. [online] URL: http://www.cimafoundation.org/wp-content/uploads/2024/08/20240618_IPA_impaginazione_FIRE_completo.pdf
- Clarke H, Gibson R, Cirulis B, Bradstock RA, Penman TD (2019). Developing and testing models of the drivers of anthropogenic and lightning-caused wildfire ignitions in south-eastern Australia. *Journal of Environmental Management* 235 (D1): 34-41. - doi: [10.1016/j.jenvman.2019.01.055](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.055)
- Colak E, Sunar F (2020). The importance of ground-truth and crowdsourcing data for the statistical and spatial analyses of the NASA FIRMS active fires in the Mediterranean Turkish forests. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 19: 100327. - doi: [10.1016/j.rsase.2020.100327](https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100327)
- D'Este M, Ganga A, Elia M, Lovreglio R, Giannico V, Spano G, Colangelo G, Laforteza R, Sanesi G (2020). Modeling fire ignition probability and frequency using hurdle models: a cross-regional study in Southern Europe. *Ecological Processes* 9 (1): 102059. - doi: [10.1186/s13717-020-00263-4](https://doi.org/10.1186/s13717-020-00263-4)
- D'Este M, Elia M, Giannico V, Spano G, Laforteza R, Sanesi G (2021). Machine learning techniques for fine dead fuel load estimation using multi-source remote sensing data. *Remote Sensing*; 13(9): 1658. - doi: [10.3390/rs13091658](https://doi.org/10.3390/rs13091658)
- Di Fazio S, Modica G (2009). Modello per la definizione di un indice statico del rischio di incendi boschivi in area euro-mediterranea. *Tecnica Agricola* 3 (4): 69-99.
- Dimitrakopoulos AP, Panov PI (2001). Pyric properties of some dominant Mediterranean vegetation species. *International Journal of Wildland Fire* 10: 23-27. - doi: [10.1071/WF01003](https://doi.org/10.1071/WF01003)
- Dunn CJ, O'Connor CD, Abrams J, Thompson MP, Calkin DE, Johnston JD, Stratton R, Gilbertson-Day J (2020). Wildfire risk science facilitates adaptation of fire-prone social-ecological systems to the new fire reality. *Environmental Research Letters* 15 (2): 025001. - doi: [10.1088/1748-9326/ab6498](https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6498)
- Eugenio FC, Rosa Dos Santos A, Fiedler NC, Ribeiro GA, Gomes Da Silva A, Banhos Dos Santos A, Gaburro Paneto G, Schettino VR (2016). Applying GIS to develop a model for forest fire risk: a case study in Espírito Santo, Brazil. *Journal of Environmental Management* 173: 65-71. - doi: [10.1016/j.jenvman.2016.02.021](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.02.021)
- Gasparini P, Di Cosmo L, Floris A, De Laurentis D (2022). Italian national forest inventory - Methods and results of the third survey. *Springer Tracts in Civil Engineering*, vol. 576. Springer, Cham, Switzerland. - doi: [10.1007/978-3-030-98678-0](https://doi.org/10.1007/978-3-030-98678-0)
- Gholamnia K, Gudiyangada Nachappa T, Ghorbanzadeh O, Blaschke T (2020). Comparisons of diverse machine learning approaches for wildfire susceptibility mapping. *Symmetry* 12: 604. - doi: [10.3390/sym12040604](https://doi.org/10.3390/sym12040604)
- Lasaponara R, Lanorte A (2007). Remotely sensed characterization of forest fuel types by using satellite ASTER data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 9 (3): 225-234. - doi: [10.1016/j.jag.2006.08.001](https://doi.org/10.1016/j.jag.2006.08.001)
- Leuenberger M, Parente J, Tonini M, Gonzalez Pereira M, Kanevski M (2018). Wildfire susceptibility mapping: deterministic vs. stochastic approaches. *Environmental Modelling and Software* 101: 194-203. - doi: [10.1016/j.envsoft.2017.12.019](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.12.019)
- ISPRA (2013). Carta della Natura - Regione Puglia. [online] URL: <http://www.isprambiente.gov.it/it/servizi/sistema-carta-della-natura/cartografia>
- ISPRA (2024). Incendi boschivi nel 2023. [online] URL: <http://www.isprambiente.gov.it/it/istituto-informa/comunicati-stampa/anno-2024/incendi-boschivi-nel-2023>
- JRC (2023). Wildfires in the European Union. Situation in the 2023 wildfire season up to August 30th, 2023. Joint Research

- Center, Ispra, VA, Italy. [online] URL: http://www.europarl.europa.eu/meetdocs/2014_2019/plmrep/COMMITTEES/AGRI/DV/2023/08-30/EFFIS_analysis_fire_damages_2023v1_EN.pdf
- JRC (2024). 2023 among five worst years for wildfires in Europe, 2024 provides some relief. Joint Research Center, Ispra, Italy. [online] URL: http://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/2023-among-five-worst-years-wildfires-europe-2024-provides-some-relief-2024-11-19_en
- Jones MW, Kelley DI, Burton CA, Di Giuseppe F, Barbosa MLF, Brambleby E, Hartley AJ, Lombardi A, Mataveli G, McNorton JR, Spuler FR, Wessel JB, Abatzoglou JT, Anderson LO, Andela N, Archibald S, Armenteras D, Burke E, Carmenta R, Chuvieco E, Clarke H, Doerr SH, Fernandes PM, Giglio L, Hamilton DS, Hans-ton S, Harris S, Jain P, Kolden CA, Kurvits T, Lampe S, Meier S, New S, Parrington M, Perron MMG, Qu Y, Ribeiro NS, Saharjo BH, San-Miguel-Ayanz J, Shuman JK, Tanpipat V, Van Der Werf GR, Veraverbeke S, Xanthopoulos G (2024). State of wildfires 2023-2024. *Earth System Science Data* 16: 3601-3685. - doi: [10.5194/essd-16-3601-2024](https://doi.org/10.5194/essd-16-3601-2024)
- Konkathi P, Shetty A, Kolluru V, Yathish PH, Pruthviraj U (2019). Static fire risk index for the forest resources of Karnataka. *IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Yokohama (Japan) 2019, pp. 6716-6719. - doi: [10.1109/IGARSS.2019.8898522](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2019.8898522)
- Kushla JD, Ripple WJ (1997). The role of terrain in a fire mosaic of a temperate coniferous forest. *Forest Ecology and Management* 95 (2): 97-107. - doi: [10.1016/S0378-1127\(97\)82929-5](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)82929-5)
- Martínez J, Vega-García C, Chuvieco E (2009). Human-caused wildfire risk rating for prevention planning in Spain. *Journal of Environmental Management* 90: 1241-1252. - doi: [10.1016/j.jenvman.2008.07.005](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.07.005)
- Martínez J, Chuvieco E, Koutsias N (2013). Modelling long-term fire occurrence factors in Spain by accounting for local variations with geographically weighted regression. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 13: 311-327. - doi: [10.5194/nhess-13-311-2013](https://doi.org/10.5194/nhess-13-311-2013)
- Oom D, De Rigo D, Pfeiffer H, Branco A, Ferrari D, Grecchi R, Artés-Vivancos T, Houston Durrant T, Boca R, Maiani P, Libertá G, San-Miguel-Ayanz J (2022). Pan-European wildfire risk assessment, EUR 31160 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg. - doi: [10.2760/9429](https://doi.org/10.2760/9429)
- Papathoma-Köhle M, Schlögl M, Garlich C, Diakakis M, Mavroulis S, Fuchs S (2022). A wildfire vulnerability index for buildings. *Scientific Reports* 12: 6378. - doi: [10.1038/s41598-022-10479-3](https://doi.org/10.1038/s41598-022-10479-3)
- Pereira JMC, Sousa AMO, Sá ACL, Martín MP, Chuvieco E (1999). Regional-scale burnt area mapping in Southern Europe using NOAA-AVHRR 1 km data. In: "Remote Sensing of Large Wildfires". Springer, Berlin/Heidelberg, Germany, pp. 139-155.
- Popović Z, Bojović S, Marković M, Cerdà A (2021). Tree species flammability based on plant traits: a synthesis. *Science of the Total Environment* 800: 149625. - doi: [10.1016/j.scitotenv.2021.149625](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149625)
- Protezione Civile (2007). Manuale operativo per la predisposizione di un piano comunale o intercomunale di Protezione Civile. Website. [online] URL: <http://emergenze.protezionecivile.gov.it/static/aefd7127e73doba99d2f6a9a6063c39a/Manuale.pdf>
- Protezione Civile (2019). Linee Guida per la redazione dei Piani di Protezione Civile Comunali. Website. [online] URL: <http://www.regione.puglia.it/documents/3171874/3251470/Linee-Guida-per-la-Redazione-dei-Piani-di-Protezione-Civile-Comunali.pdf/2a974667-egba-6faf-6dba-oc2f24b98d6b?t=1656526012479>
- Protezione Civile Regione Puglia (2023). Piano regionale di previsione, prevenzione e lotta attiva contro gli incendi boschivi 2023-2025. Website. [online] URL: <http://protezionecivile.regione.puglia.it/-/piano-regionale-di-previsione-prevenzione-e-lotta-attiva-contro-gli-incendi-boschivi-2023-2025>
- Rodrigues M, De la Riva J, Fotheringham S (2014). Modeling the spatial variation of the explanatory factors of human-caused wildfires in Spain using geographically weighted logistic regression. *Applied Geography* 48 (1-2): 52-63. - doi: [10.1016/j.apgeog.2014.01.011](https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.01.011)
- Rodrigues M, Zúñiga-Antón M, Alcasena F, Gelabert P, Vega-García C (2022). Integrating geospatial wildfire models to delineate landscape management zones and inform decision-making in Mediterranean areas. *Safety Science* 147: 105616. - doi: [10.1016/j.ssci.2021.105616](https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105616)
- Rothermel R (1983). How to predict the spread and intensity of forest and range fires. General Technical Report INT-143, USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, UT, USA, pp. 161.
- Saaty TL (1990). Multicriteria decision making: the analytic hierarchy process. RWS Publications, 4922 Ellsworth Avenue, Pittsburgh, PA, USA.
- Saaty TL (2000). Models, methods, concepts and applications of the analytic hierarchy process. Kluwer Academic Publishers, Boston, MA, USA.
- San-Miguel-Ayanz J, Durrant T, Boca R, Maiani P, Libertá G, Jacome Felix Oom D, Branco A, De Rigo D, Suarez-Moreno M, Ferrari D, Roglia E, Scionti N, Broglia M, Onida M, Tistan A, Loffler P (2024). Forest fires in Europe, Middle East and North Africa 2023. Publications Office of the European Union, Luxembourg. - doi: [10.2760/8027062](https://doi.org/10.2760/8027062)
- Tonini M, D'Andrea M, Biondi G, Degli Esposti S, Trucchia A, Fiorucci P (2020). A machine learning-based approach for wildfire susceptibility mapping. The case study of the Liguria Region in Italy. *Geosciences* 10: 105. - doi: [10.3390/geosciences10030105](https://doi.org/10.3390/geosciences10030105)
- Trucchia A, Meschi G, Fiorucci P, Gollini A, Negro D (2022). Defining wildfire susceptibility maps in Italy for understanding seasonal wildfire regimes at the national level. *Fire* 5 (1): 30. - doi: [10.3390/fire5010030](https://doi.org/10.3390/fire5010030)
- Trucchia A, Meschi G, Fiorucci P, Provenzale A, Tonini M, Pernice U (2023). Wildfire hazard mapping in the eastern Mediterranean landscape. *International Journal of Wildland Fire* 32: 417-434. - doi: [10.1071/WF22138](https://doi.org/10.1071/WF22138)
- Turco M, Rosa-Cánovas JJ, Bedia J, Jerez S, Montávez JP, Llasat MC, Provenzale A (2018). Exacerbated fires in Mediterranean Europe due to anthropogenic warming projected with non-stationary climate-fire models. *Nature Communications* 9: 3821. - doi: [10.1038/s41467-018-06358-z](https://doi.org/10.1038/s41467-018-06358-z)
- Vadrevu KP, Eaturu A, Badarinath KVS (2010). Fire risk evaluation using multicriteria analysis - a case study. *Environmental Monitoring and Assessment* 166 (1-4): 223-239.
- Vicente López FJD, Crespo Abril F (2012). A new wildland fire danger index for a Mediterranean region and some validation aspects. *International Journal of Wildland Fire* 21 (8): 1030-1041. - doi: [10.1071/WF11046](https://doi.org/10.1071/WF11046)
- Zhang H, Qi P, Guo G (2014). Improvement of fire danger modeling with geographically weighted logistic model. *International Journal of Wildland Fire* 23 (8): 1130-1146. - doi: [10.1071/WF13195](https://doi.org/10.1071/WF13195)
- Xi DDZ, Taylor SW, Woolford DG, Dean CB (2019). Statistical models of key components of wildfire risk. *Annual Review of Statistics and Its Application* 6 (1): 197-222. - doi: [10.1146/annurev-statistics-031017-100450](https://doi.org/10.1146/annurev-statistics-031017-100450)

Materiale Supplementare

Fig. S1 - Localizzazione degli incendi nel periodo 2012-2021.

Fig. S2 - Rappresentazione e mappatura degli indici di pericolo.

Fig. S3 - Mappe delle variabili climatiche utilizzate per il calcolo dell'IPC.

Fig. S4 - Indice di densità antropica IPA e relativi sottoindici.

Fig. S5 - Mappa dell'indice di pericolosità globale IPG.

Fig. S6 - Mappa dell'Indice di Superficie Percorsa dal Fuoco.

Fig. S7 - Mappa dell'Indice delle Caratteristiche dell'Incendio (ICI).

Fig. S8 - Mappa dell'indice di vulnerabilità specifica (IVS).

Fig. S9 - Mappa dell'indice dei valori delle risorse IVR e relativi sottoindici.

Fig. S10 - Mappe degli indici IVI, IVB e IVG.

Fig. S11 - Mappa dell'Indice di rischio incendi boschivi IRB e relativi sottoindici IVB e IPG.

Fig. S12 - Mappa dell'indice di rischio di interfaccia (IRI).

Link: [Cillis_4800@suppl001.pdf](#)