Interreg Italia-Slovenija
Karst Firewall 5.0

Cofinanziato dall'Unione europea
Sofinancira Evropska unija

# SVILUPPO CONGIUNTO DI STRATEGIE DI ADATTAMENTO AGLI INCENDI BOSCHIVI ADATTATE ALL'AREA CARSICA TRANSFRONTALIERA

## OUTPUT 1,1

**KARST FIREWALL 5.0**

**Adattamento innovativo al cambiamento climatico basato sugli ecosistemi nella regione del Carso. Promuovere una silvicoltura resistente agli incendi con il supporto di Industria 5.0**

**Inovativno ekosistemsko-zasnovano prilagajanje podnebnim spremembam na Krasu. Spodbujanje požarno odporne gmajne s podporo industrije 5.0**

Il progetto Karst Firewall 5.0 è co-finanziato dall'Unione europea nell'ambito del Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia.
Projekt Karst Firewall 5.0 sofinancira Evropska unija v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.
www.ita-slo.eu/karst-firewall-50

| INFORMAZIONI | |
|---|---|
| Acronimo del progetto / Akronim projekta: | KARST FIREWALL 5.0 |
| Titolo del progetto / Naslov projekta: | Adattamento innovativo al cambiamento climatico basato sugli ecosistemi nella regione del Carso. Promuovere una silvicoltura resistente agli incendi con il supporto di Industria 5.0<br><br>Inovativno ekosistemsko-zasnovano prilagajanje podnebnim spremembam na Krasu. Spodbujanje požarno odporne gmajne s podporo industrije 5.0 |
| Area prioritaria / Prednostno področje: | Un'Europa più verde e a basse emissioni di carbonio, che si muove verso un'economia a zero emissioni di carbonio e resiliente<br><br>Bolj zelena, nizkoogljična Evropa, ki prehaja na gospodarstvo z ničelno stopnjo neto emisij ogljika in je odporna |
| Obiettivo specifico del programma / Specifični cilj programa: | SO4: Promuovere l'adattamento ai cambiamenti climatici e la prevenzione del rischio di catastrofi e la resilienza, tenendo conto degli approcci ecosistemici.<br><br>SO4: Spodbujanje prilagajanja podnebnim spremembam in preprečevanja tveganja nesreč ter odpornosti ob upoštevanju ekosistemskih pristopov |
| URL del sito web del progetto / URL spletne strani projekta: | www.ita-slo.eu/en/karst-firewall-50 |
| | |
| Numero del documento / Številka dokumenta | KFW50-O11 |
| Titolo del documento / Naslov dokumenta | SVILUPPO CONGIUNTO DI STRATEGIE DI ADATTAMENTO AGLI INCENDI BOSCHIVI ADATTATE ALL'AREA CARSICA TRANSFRONTALIERA |
| Work Package | 1 |
| Attività / Aktivnost | Ouput 1.1 |
| Partner responsabili (autori) / Odgovorni partnerji (avtorji) | IUAV Università di Venezia (IT) (Granceri Bradaschia, M.; Morassutti G.; Longato D.; Maragno D.; Musco F.) |
| Partner coinvolti / Sodelujoči partnerji | Corpo Forestale FVG (IT), Zavoda za gozdove Slovenije (SI), Infordata (IT), ZRC-SAZU (SI) |
| Luogo e data di pubblicazione / Kraj in datum objave | Trieste, 30/07/2026 |

## Sommario

1 INTRODUZIONE ..... 5
1.1 Il Progetto Karst Firewall 5.0 ..... 5
2 L'AREA DI STUDIO ..... 7
3 LE ANALISI DI PERICOLO E VULNERABILITÀ ..... 8
4 L'ANALISI DEL PERICOLO DI INCENDIO BOSCHIVO ..... 10
5 L'ANALISI DI VULNERABILITÀ AGLI INCENDI BOSCHIVI ..... 12
6 APPROFONDIMENTO SUGLI APPROCCI ADOTTATI PER L'ANALISI DEL PERICOLO E DELLA VULNERABILITÀ AGLI INCENDI BOSCHIVI ..... 13
7 L'ABACO DELLE AZIONI PER LA RIDUZIONE DEL RISCHIO INCENDIO BOSCHIVO SUL CARSO 14
7.1 COME LEGGERE QUESTO ABACO ..... 16
7.2 GLOSSARIO ..... 17
LE MISURE DI PREVENZIONE DEL RISCHIO INCENDIO BOSCHIVO ..... 18
8 GLI INTERVENTI DIRETTI SUL TERRITORIO ..... 19
8.1 RIMOZIONE SELETTIVA SPECIE AD ALTO RISCHIO INCENDIO ..... 19
8.2 CREAZIONE, MANTENIMENTO E ALLARGAMENTO DELLE PISTE TAGLIAFUOCO ..... 20
8.3 CREAZIONE DI AREE CUSCINETTO SENZA O A BASSA VEGETAZIONE ATTORNO AD INFRASTRUTTURE E CENTRI ABITATI ..... 21
8.4 DESTINAZIONE DI ZONE SICURE PER L'ACCUMULO DELLA NECROMASSA ..... 23
8.5 DIRADAMENTO DI VEGETAZIONE TRAMITE INCENDI CONTROLLATI ..... 24
8.6 CREAZIONE DI BACINI IDRICI ARTIFICIALI PER LO SPEGNIMENTO DEL FUOCO ..... 25
8.7 MANTENIMENTO DELLA LANDA CARSICA ..... 26
8.8 MANTENIMENTO E INNALZAMENTO DEI MURETTI A SECCO ..... 28
9 PIANIFICARE LA RESILIENZA DEL PAESAGGIO AGLI INCENDI BOSCHIVI ..... 29
9.1 DIVIETO DI RILASCIARE PERMESSI DI EDIFICAZIONE IN AREE VULNERABILI E ISOLATE 29
9.2 STANDARD DI UTILIZZO DI MATERIALE IGNIFUGO ..... 30
9.3 LA FRAMMENTAZIONE DEL PAESAGGIO ED IL MOSAICO DI COMBUSTIBILE ..... 31
9.4 PAGAMENTI PER I SERVIZI ECOSISTEMICI ..... 32
9.5 ZONE DI INTERVENTO FORESTALE ..... 34

10 LA SENSIBILIZZAZIONE E LA PROTEZIONE CIVILE .....35
10.1 SISTEMA DI MESSAGGISTICA DI ALLERTA .....35
10.2 CAMPAGNE DI SENSIBILIZZAZIONE AL RISCHIO INCENDIO E PRESCRIZIONI DI COMPORTAMENTO NEI PERIODI DI MAGGIOR RISCHIO .....36
11 IL RILEVAMENTO IN TEMPO REALE DEGLI INCENDI – *EARLY WARNING SYSTEM* .....37
11.1 IL MONITORAGGIO DEL BOSCO CON I SATELLITI .....37
11.2 IL MONITORAGGIO DEL BOSCO CON LA VIDEOSORVEGLIANZA .....38
11.3 I SENSORI PER IL RILEVAMENTO IN TEMPO REALE DEGLI INCENDI .....39
12 BIBLIOGRAFIA .....40

# 1 INTRODUZIONE

## 1.1 Il Progetto Karst Firewall 5.0

Il regime degli incendi boschivi nell'area del Kras/Carso è influenzato dal cambiamento climatico in corso. È probabile che gli incendi diventino più frequenti e intensi a causa di diversi trend, come l'aumento delle temperature, ondate di calore prolungate e siccità (Dupuy et al., 2020). Le strategie attuali di gestione degli incendi stanno diventando meno efficaci, rendendo necessario esplorare nuove modalità di adattamento. Il progetto Karst Firewall 5.0 affronta due sfide presenti nell'area del programma: gli incendi boschivi e la gestione della governance degli stessi. Per affrontarli intende sviluppare piani di azione innovativi per preservare lo stato di salute del territorio carsico e massimizzarne la resilienza, ponendo uno sguardo al futuro. Data le caratteristiche transfrontaliere dell'area di studio nel paesaggio carsico tra Italia e Slovenia, è fondamentale promuovere la cooperazione tra entrambi i paesi per affrontare l'urgente necessità di ridurre il rischio di incendi e sviluppare strategie di risposta tempestive, come dimostrato dall'importante incendio dell'estate 2022.

Il progetto intende aprire la strada non solo a un maggiore dialogo e a una maggiore cooperazione tra gli attori direttamente coinvolti nella gestione e nell'attuazione delle strategie di risposta agli incendi boschivi dai due lati del confine, ma anche tra gli attori di diversi settori, nonché la comunità in generale che sono in qualche modo coinvolti negli impatti che ne derivano. In questo modo, il progetto Karst Firewall potrebbe essere davvero determinante per lo sviluppo di un efficace meccanismo transfrontaliero di prevenzione e gestione degli incendi boschivi, grazie al fatto che tutti gli attori coinvolti, dai singoli cittadini e utenti del territorio ai decisori di alto livello, svolgono un ruolo molto importante e complementare a questo obiettivo.

Il Work Package 1 del progetto Karst Firewall 5.0 è intitolato "Come renderlo meno infiammabile: un quadro concettuale per la riduzione del rischio di incendi transfrontalieri nel Carso" e mira a sviluppare un quadro concettuale per promuovere la riduzione del rischio di incendi boschivi attraverso la creazione di una collaborazione transfrontaliera per un'efficace gestione adattiva degli incendi boschivi nelle regioni carsiche. Ciò include l'elaborazione di specifiche analisi spaziali che analizzano il pericolo di incendi boschivi, attuale e nel futuro prossimo secondo i dati fornitici dalle proiezioni climatiche e la vulnerabilità del territorio nell'area di progetto, oggetto di questo deliverable. A tale scopo, sono stati selezionati e testati due approcci: l'analisi tramite **modellazione di Massima Entropia (MaxEnt)** per la valutazione del **pericolo di incendi boschivi** (di seguito definita come pericolo) e **l'Analisi**

**Decisionale Multi-criteriale (MCDA)** per l'analisi della **vulnerabilità del territorio agli incendi** (di seguito vulnerabilità).

La modellazione con MaxEnt ha guadagnato una vasta popolarità grazie alla sua relativa semplicità ed è ampiamente utilizzata, soprattutto nei campi dell'ecologia e della biogeografia (Phillips et al., 2006). Tuttavia, questi metodi di modellazione ecologica, come MaxEnt, i modelli lineari generalizzati (GLM) o i modelli additivi generalizzati (GAM), si sono già dimostrati efficaci anche in altri campi per prevedere la distribuzione spaziale di determinati fenomeni e comprendere i i pattern spaziali dei processi naturali. Ad esempio, la modellazione con MaxEnt è stata utilizzata per prevedere la distribuzione spaziale di grotte che identificano le aree del più critiche per il flusso delle acque sotterranee nel sistema carsico (Blitch et al., 2023). Negli ultimi anni, MaxEnt è stato utilizzato con successo anche per valutare il rischio, la vulnerabilità e la probabilità di incendi boschivi in ambienti diversi, performando in alcuni studi comparativi meglio di algoritmi di Random forest e modelli GLM (Kim et al., 2019; Mishra et al., 2023; Paudel et al., 2024; Vilar et al., 2016; Yang et al., 2021).

L'analisi di vulnerabilità agli incendi boschivi richiede la valutazione di fattori diversi che possono concorrere a determinarlo. Poiché questi fattori sono eterogenei, caratterizzati da un certo grado di importanza relativa e misurati con unità di misura diverse, per identificare le aree di maggiore o minore vulnerabilità agli incendi è stato scelto l'approccio dell'analisi decisionale multi-criteriale (MCDA) applicato a valutazioni spazialmente esplicite con sistemi informativi geografici (GIS) (Malczewski, 2006). Nell'ambito dell'MCDA, il metodo Analytic Hierarchy Process (AHP), uno dei metodi più diffusi per valutare l'importanza relativa di tutti i fattori analizzati (Gigović & Jakovljević, 2018; Goleiji et al., 2017; Maniatis et al., 2022; Sivrikaya & Küçük, 2022) è stato utilizzato per assegnare i pesi rappresentanti l'importanza relativa di tutti i fattori selezionati. L'AHP è stato teorizzato per la prima volta da Saaty (2002) per confrontare i diversi criteri in un MCDA e fornire un metodo matematico per quantificare le valutazioni soggettive della loro relativa importanza.

Le analisi del pericolo e della vulnerabilità agli incendi boschivi sul Carso non hanno avuto un valore puramente conoscitivo, ma hanno costituito la base empirica su cui è stata costruita la strategia transfrontaliera di prevenzione, articolata in una serie di misure preventive e di pronta risposta – dagli interventi diretti sul territorio alla pianificazione territoriale integrata e ai sistemi di allerta precoce – individuate e condivise congiuntamente dai partner italiani e sloveni come risposta operativa diretta ai rischi e alle vulnerabilità evidenziati dalle analisi.

# 2 L'AREA DI STUDIO

L'area di studio comprende la regione storico-geografica dell'altopiano carsico (denominato Carso in Italia e Kras in Slovenia) e le sue aree limitrofe, abbracciando il nord del Mare Adriatico. L'area di studio si estende per circa 1000 km², ricadendo approssimativamente per il 30% in Italia e per il 70% in Slovenia. L'area è compresa tra le coordinate geografiche 13,47 long., 45,55 lat. e 14,05 long., 45,96 lat. (EPSG:4326-WGS84). L'area è caratterizzata sia da climi mediterranei superiori, sulla costa, sia da zone fitoclimatiche più continentali sul versante interno. Il Carso è un classico esempio di altopiano a substrato calcareo, che si innalza rapidamente dalla costa fino a 350 m s.l.m., con creste collinari che raggiungono i 400-700 m s.l.m.. La vegetazione varia dalle macchie costiere di leccio mediterraneo (Quercus ilex) alle associazioni di carpino nero (Ostrya carpinifolia) e frassino (Fraxinus ornus), dominate dalla roverella (Quercus pubescens) che ricopre sempre la landa carsica sull'altopiano, sempre di più in stato di abbandono (Oriolo et al., 2021). Sono comuni macchie di foreste di pino nero (Pinus nigra), specie non autoctona importata con gli sforzi di rimboschimento della landa carsica risalenti al XIX secolo.

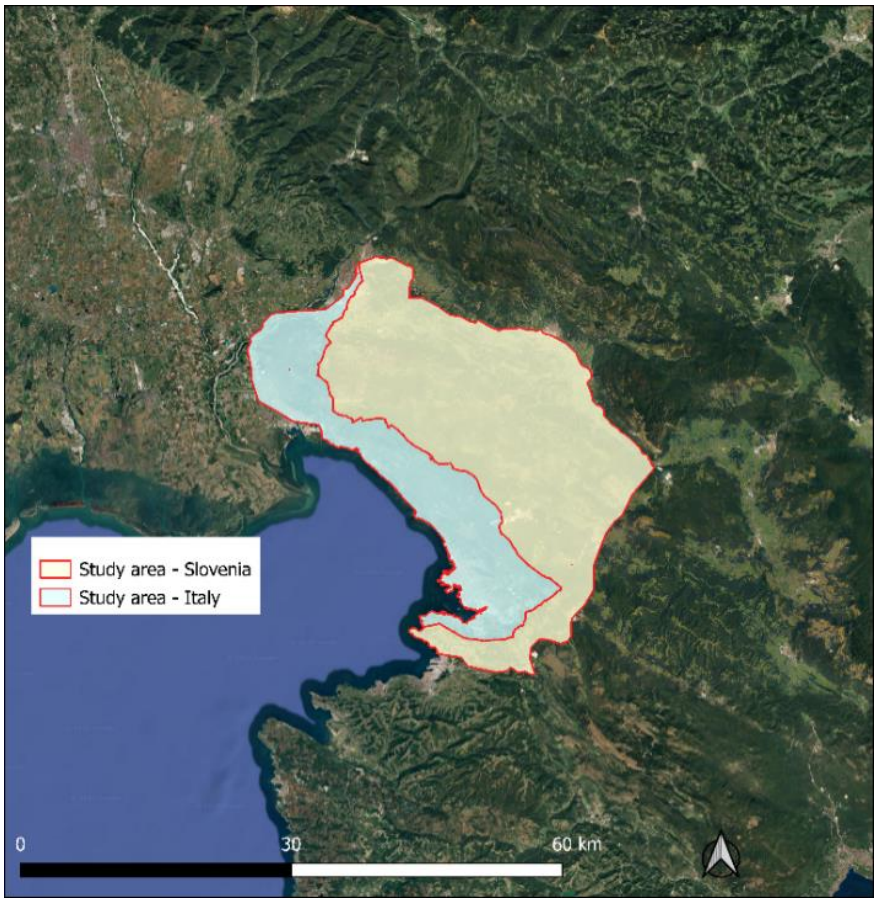



*Figura 1: L'area di studio. A sinistra la parte ricadente in Italia, a destra in Slovenia.*

# 3 LE ANALISI DI PERICOLO E VULNERABILITÀ

Questo lavoro ha eseguito due analisi: **Il pericolo di incendi boschivi** basata sulla modellazione di Massima Entropia (MaxEnt) e la **vulnerabilità agli incendi boschivi** basata sull'Analisi Decisionale Multicriteriale (MCDA) utilizzando l'Analytic Hierarchy Process (AHP). Prima di eseguire le analisi sono state selezionate, sulla base dei dati transfrontalieri disponibili (e comparabili), le variabili esplicative che concorrono all'innesco e alla diffusione degli incendi.

Sulla base di una revisione della letteratura (Gigović & Sekulović, 2018; Maniatis et al., 2022; Mishra et al., 2023; Nuthammachot & Stratoulias, 2021; Sivrikaya & Küçük, 2022; Trucchia et al., 2022, 2023; Yang et al., 2021), sono state selezionate **11 variabili esplicative** che sono state utilizzate per la modellazione e le analisi in quanto potenziali fattori che influenzano il pericolo e la vulnerabilità agli incendi boschivi. Tra queste vi sono delle variabili che riflettono le caratteristiche **antropiche** (la distanza da ferrovie, strade (strade principali, strade forestali e sentieri escursionistici) e insediamenti), **ambientali** (copertura del suolo), **climatiche** (precipitazioni e temperatura) e **topografiche** (aspetto, elevazione, pendenza, Indice di Posizionamento Topografico (TPI, *Topographic Position Index*), Indice Topografico di Saturazione (TWI, *Topographic Wetness Index*), un indice della saturazione del versante). L'elenco delle variabili, con la fonte dei dati, è riportato nella Tabella 1. Tutte le variabili sono state elaborate con i software ESRI ArcGIS Pro 3.4.0 (ESRI, Redlands, CA, USA) e QGIS 3.40.4 (QGIS Development Team, 2025).

A causa della natura transfrontaliera dell'area di studio, sono state incontrate alcune sfide nella raccolta e nella standardizzazione dei dati di input. Al fine di ottenere la massima risoluzione possibile, abbiamo cercato di ottenere il maggior numero possibile di dati da banche dati locali, nazionali o regionali (Tabella 1). I dati che riflettono le caratteristiche antropiche sono stati forniti dall'Autorità di rilevamento e cartografia della Repubblica di Slovenia (GURS) e dall'Infrastruttura per i dati ambientali e territoriali (IRDAT) della Regione autonoma Friuli-Venezia Giulia (RAFVG). Tuttavia, poiché Openstreetmap (OSM) contiene una rappresentazione più completa dei sentieri escursionistici, sia in Italia che in Slovenia, i layer delle strade è stato integrato con elementi scaricati dal database OSM. Per elaborare invece il layer di copertura del suolo, si è scelto di ricorrere ai dati di copertura del suolo nazionali e regionali, che hanno una risoluzione significativamente più alta rispetto alla carta europea Corine Land Cover (CLC). A causa delle diverse caratteristiche spazio-temporali dei dati climatici nazionali e regionali per l'Italia e la Slovenia, si è deciso di utilizzare i dati forniti dal progetto CHELSA Climate sia per le

serie storiche climatiche più recenti (1981-2010) che per le proiezioni climatiche del prossimo futuro (2011-2040) (Brun et al., 2022; Karger et al., 2017).

*Tabella 1: Elenco delle variabili con la fonte dei dati*

| | Variabile | Fonte del dato SLO | Fonte del dato ITA |
|---|---|---|---|
| **Antropiche** | Distanza da strade, strade boschive e sentieri | Dati forniti dall'Autorità di Geografia della Repubblica Slovenia (GURS), Openstreetmap | RAFVG, ISPRA e Insiel S.p.a., Openstreetmap |
| | Distanza da ferrovie | | |
| | Distanza da insediamenti | | |
| **Ambientali** | Copertura del suolo | Dati forniti dal Ministero dell'Agricoltura, delle Foreste e dell'Almentazione (MKGP), Corine Land Cover (CLC) | RAFVG, Corine Land Cover (CLC) |
| **Climatiche** | Precipitazione media annua (1981–2010) | CHELSA Climate (Brun et al., 2022; Karger et al., 2017) | |
| | Temperatura media annua (1981–2010) | | |
| | Precipitazione media annua (2011–2040) | | |
| | Temperatura media annua (2011–2040) | | |
| **Topografiche** | Orientamento del terreno | Dati Lidar (risoluzione 1 × 1 m) forniti dall'Agenzia della Repubblica Slovenia per l'Ambiente (ARSO) | Dati Lidar (risoluzione 1 x 1 m cell) forniti dalla RAFVG |
| | Altitudine | | |
| | Pendenza | | |
| | Indice di Posizonamento Topografico (TPI) | | |
| | Indice Topografico di Saturazione (TWI) | | |

# 4 L'ANALISI DEL PERICOLO DI INCENDIO BOSCHIVO

I livelli finali del pericolo attuale e futuro di incendi boschivi sono stati classificati in cinque livelli (basso, moderato, alto, significativamente alto ed estremamente alto) in base all'intervallo definito, di dimensioni pari a 0,20 (Fig. 6). Le cinque classi con diversi livelli di pericolosità classificata rappresentano rispettivamente il 22,71%, il 38,20%, il 23,00%, il 10,30% e il 5,78% dell'area di studio (Tabella 2). La maggior parte dell'area di studio è coperta da aree classificate a pericolosità moderata, che coprono il 38,20% dell'area totale. Seguono le aree con pericolosità elevata (23,00%) e bassa (22,71%). Le aree con pericolosità significativamente ed estremamente alta rappresentano rispettivamente il 10,30% e il 5,78% (Tabella 2). È evidente che le aree classificate come zone di pericolo di incendi boschivi significativamente elevato e superiore rappresentano una percentuale relativamente bassa (16,08%) dell'area di studio.

Nello scenario futuro di pericolo di incendi boschivi, i cinque livelli rappresentano rispettivamente il 26,83%, il 40,16%, il 21,25%, l'8,24% e il 3,51% dell'area di studio (Tabella 2). Analogamente all'attuale pericolo di incendi boschivi, la maggior parte dell'area di studio rimane nella categoria di pericolo di incendi boschivi moderato, coprendo il 40,16% dell'area totale. Tuttavia, l'area classificata a basso pericolo di incendi boschivi è aumentata del 4,12%, raggiungendo il 26,83%, mentre la categoria di pericolo di incendi boschivi elevato è leggermente diminuita, attestandosi al 21,25%. In particolare, la percentuale di aree classificate a pericolo di incendi boschivi significativamente elevato ed estremamente elevato è diminuita, rispettivamente, dal 2,06% e dal 2,27% all'8,24% e al 3,51% (Tabella 2). Ciò indica che in futuro si osserverà uno spostamento globale della pericolosità di incendi boschivi verso livelli più bassi, con un minor numero di aree soggette a condizioni di pericolosità significativamente o estremamente elevata.

Un'analisi della distribuzione spaziale delle zone di pericolosità rivela una considerevole variazione geografica del rischio di incendi boschivi all'interno dell'area di studio. Le aree con pericolo di incendio elevato, significativamente elevato ed estremamente elevato sono distribuite prevalentemente lungo la costa e attorno ai maggiori insediamenti, dove la densità di strade e ferrovie è maggiore. Le proiezioni indicano che nelle proiezioni climatiche future il pericolo di incendi boschivi diminuirà nelle regioni costiere, mentre aumenterà nelle aree interne (Fig. 6).

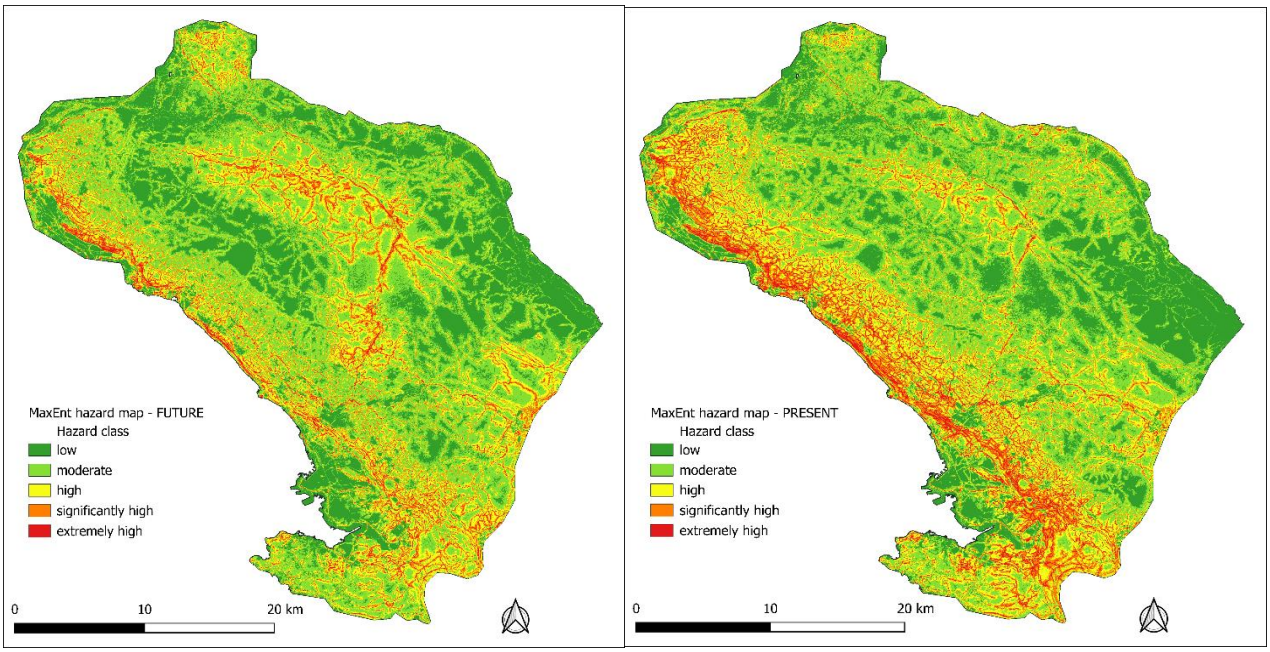



*Figura 2: Carta del pericolo di incendi boschivi nelle condizioni climatiche attuali, a destra, e future, a sinistra.*

*Tabella 2: Area (km$^2$) delle classi di pericolo nell'area studio secondo le condizioni climatiche odierne e future e lor percentuale sul totale (%).*

| | Pericolo odierno | | Pericolo futuro | | Differenza | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Area | Percentuale | Area | Area | Percentuale | Area |
| Bassa | 228,36 | 22,71 | 269,78 | 26,83 | 41,42 | 4,12 |
| Moderata | 384,10 | 38,20 | 403,83 | 40,16 | 19,73 | 1,96 |
| Elevata | 231,28 | 23,00 | 213,67 | 21,25 | -17,61 | -1,75 |
| Significativamente elevata | 103,60 | 10,30 | 82,88 | 8,24 | -20,72 | -2,06 |
| Estremamente elevata | 58,12 | 5,78 | 35,30 | 3,51 | 22,82 | -2,27 |
| Totale | 1005,46 | 100 | 1005,46 | 100 | / | / |

# 5 L'ANALISI DI VULNERABILITÀ AGLI INCENDI BOSCHIVI

Le carte di vulnerabilità (Figura 3) mostrano che, nelle attuali condizioni climatiche, la maggior parte dell'area di studio rientra nella classe di vulnerabilità significativamente elevata (67%), seguita dalle aree di vulnerabilità estrema (25%) (Tabella 3). Considerando le proiezioni climatiche future, le aree caratterizzate da una vulnerabilità estremamente elevata aumentano fino al 30%, a scapito di quelle caratterizzate da una vulnerabilità significativamente elevata (62%) (Tabella 3).

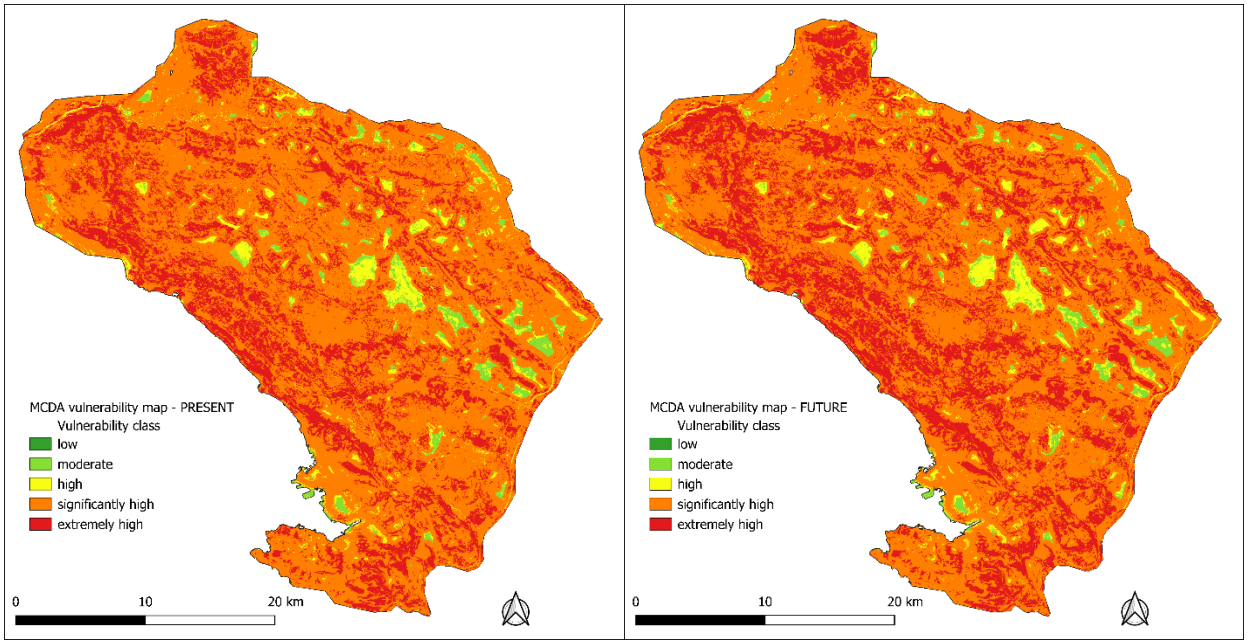



*Figura 3: Carta della vulnerabilità nelle condizioni climatiche odierne, sulla sinistra, e secondo le proiezioni climatiche future, sulla destra.*

*Tabella 3: Area ($km^2$) delle classi di vulnerabilità nell'area studio secondo le condizioni climatiche odierne e future e percentuale sul totale (%).*

| | Vulnerabilità odierna | | Vulnerabilità futura | | Differenza | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Area | Percentuale | Area | Percentuale | Area | Percentuale |
| Bassa | 0,04 | 0,004 | 0,02 | 0,002 | -0,02 | -0,001 |
| Moderata | 25,1 | 2,49 | 21,2 | 2,11 | -3,86 | -0,38 |
| Elevata | 44,8 | 4,46 | 43,3 | 4,31 | -1,52 | -0,15 |
| Significativamente elevata | 679,4 | 67,58 | 630,4 | 62,70 | -49,04 | -4,87 |
| Estremamente elevata | 256,1 | 25,47 | 310,4 | 30,87 | 54,32 | 5,40 |
| Totale | 1005,5 | 100,00 | 1005,5 | 100,00 | - | - |

Le variabili climatiche sembrano comunque essere la categoria meno impattante sulla vulnerabilità agli incendi boschivi nel nostro scenario. Infatti, i layer di dati climatici utilizzati nello studio tengono conto solo dei valori medi annui di temperatura e dei valori cumulativi annui di precipitazione. La mancanza di una distribuzione dei dati nell'arco dell'anno non consente di distinguere gli andamenti meteorologici stagionali, che potrebbero celare la presenza di periodi più lunghi caratterizzati da clima secco e caldo. Inoltre, le proiezioni della quantità e della distribuzione delle precipitazioni durante le stagioni sono più difficili da stabilire a causa dell'elevato numero di variabili coinvolte e sono per lo più non significative per il periodo futuro più prossimo (Bertalanič et al., 2018).

# 6 APPROFONDIMENTO SUGLI APPROCCI ADOTTATI PER L'ANALISI DEL PERICOLO E DELLA VULNERABILITÀ AGLI INCENDI BOSCHIVI

Le carte di vulnerabilità e di pericolo ottenute sono notevolmente diverse. Mentre infatti l'analisi della vulnerabilità ha identificato come aree di vulnerabilità significativamente ed estremamente elevata il 93% dell'area di studio che rientra in aree ad alta vulnerabilità, le due classi di pericolo più elevato costituiscono solamente il 16% dell'intera area di studio nell'analisi del pericolo di incendio. Ciò è probabilmente dovuto alla distribuzione spaziale degli incendi boschivi passati, particolarmente concentrata in un'area ristretta rispetto all'intera area studio. Il dataset di input è stato appositamente ridotto da 2367 a 1206 punti per ridurne l'effetto distorsivo sul modello. La modellazione MaxEnt sembra essere più indicata per le analisi del pericolo di incendio boschivo, appunto perché è focalizzata sulla probabilità di accadimento di incendi boschivi. D'altra parte, l'analisi di vulnerabilità distribuisce equamente le aree ad alta vulnerabilità in tutta l'area studio, indipendentemente dagli eventi di incendio passati, fornendo così informazioni, oltre che sulle aree in cui è più probabile che gli incendi boschivi si inneschino, anche su dove è più probabile che si propaghino una volta innescati.
Un'altra differenza fondamentale tra i due metodi è la proiezione futura della probabilità di rischio di incendi boschivi e della loro vulnerabilità. Nello specifico, l'analisi di vulnerabilità prevede un aumento delle aree classificate a vulnerabilità estremamente elevata, dal 25% al 30% dell'area totale, mentre l'analisi di pericolosità ha previsto una diminuzione della probabilità di incendi boschivi nello scenario climatico futuro. Ciò è verosimilmente dovuto al fatto che, come risulta dall'AHP nell'analisi di vulnerabilità, alla temperatura e alle precipitazioni viene attribuito un peso rispettivamente del 4,32% e dell'1,44%. L'analisi indica che la temperatura ha un impatto tre volte superiore a quello delle precipitazioni sulla vulnerabilità finale, mentre l'analisi di pericolosità MaxEnt assegna alla temperatura e alla precipitazione un contributo rispettivamente del 2,8% e del 7,0%. Secondo le proiezioni

climatiche future, è previsto che entrambe le variabili aumenteranno, ma ciascuna ha un effetto opposto sugli incendi boschivi. A seconda di quale delle due prevalga in ciascun approccio, i risultati saranno contraddittori.
Entrambi gli approcci si sono dimostrati strumenti efficaci per la mappatura della pericolosità e della vulnerabilità agli incendi boschivi, concentrandosi su diverse caratteristiche del rischio. La loro efficacia nell'analisi del rischio di incendio boschivo può quindi essere massimizzata integrando i rispettivi risultati. La modellazione MaxEnt ha fornito preziose informazioni attraverso le curve di risposta, dimostrando che la probabilità di incendi boschivi è maggiore sui pendii esposti a sud e sud-ovest, nelle aree forestali seminaturali e di conifere e nelle regioni con precipitazioni e pendenze moderate. Inoltre, la probabilità di rischio di incendi boschivi ha mostrato anche una forte correlazione negativa con la distanza da strade, ferrovie e insediamenti, sottolineando il ruolo critico delle infrastrutture nell'innesco degli incendi boschivi.

# 7 L'ABACO DELLE AZIONI PER LA RIDUZIONE DEL RISCHIO INCENDIO BOSCHIVO SUL CARSO

È in questo contesto che la pianificazione integrata del paesaggio appare come la strategia necessaria e più efficace per aumentare la resilienza del territorio: non solo a livello locale, ma transfrontaliera. Il Carso non riconosce confini politici nei suoi continui vegetazionali e nella propagazione del fuoco: i territori italiano e sloveno interagiscono quotidianamente nei processi climatici e nei movimenti del fuoco. Dopo gli incendi estesi dell'estate 2022, numerose iniziative hanno coinvolto cooperazione operativa tra vigili del fuoco, enti forestali, protezione civile e istituzioni locali su entrambi i lati del confine per gli interventi di spegnimento, monitoraggio e prevenzione. Tuttavia, manca ancora un quadro normativo e di pianificazione del territorio transfrontaliero che definisca regole condivise per uso del suolo, vincoli per edificazioni, gestione del combustibile e manutenzione attiva. Colmare questo gap è cruciale per affrontare in modo coerente il rischio incendi in un paesaggio che, dal punto di vista ecologico e climatico, è unico e continuo.

Un numero crescente di studi rileva che il rischio incendi non può essere efficacemente mitigato se le politiche restano settoriali. La progettazione forestale e paesaggistica che incorpora metriche del rischio antincendio rende i territori maggiormente

resistenti al fuoco, pur mantenendo la redditività economica (González-Olabarria and Pukkala, 2011). Ad esempio, le ricerche dimostrano che la combinazione di pascolo con incendi pianificati mantiene effettiva la riduzione del combustibile nel tempo, più a lungo di ciascuna misura presa singolarmente (Starns et al., 2019).

In parallelo, il cambiamento climatico sta aggravando questi fattori di rischio: gli scenari climatici per l'Europa meridionale e l'area adriatica indicano un aumento delle temperature medie, ondate di calore più frequenti e prolungate e una riduzione delle precipitazioni estive, che insieme portano a suoli e vegetazione più secchi, aumento dei giorni con condizioni meteorologiche favorevoli all'innesco e alla propagazione degli incendi (Granceri Bradaschia *et al.*, 2025). Questi cambiamenti incrementano l'estensione potenziale degli incendi e la probabilità di eventi estremi. In particolare, la combinazione di vento di bora, basse umidità e alte temperature estive già osservata nel Carso tenderà a intensificarsi, aumentando la finestra di pericolosità e riducendo i giorni sicuri per operazioni di prevenzione.

Per questo la pianificazione integrata deve incorporare esplicitamente scenari climatici futuri e modelli previsionali di rischio: gli strumenti urbanistici comunali devono coordinarsi con i piani paesaggistici e regionali, con i piani antincendio boschivo e con le politiche di protezione civile, normando dove non è consentita l'edificazione, prevedendo fasce di rispetto vegetazionale, definendo materiali ignifughi, reti di piste tagliafuoco, infrastrutture idriche di supporto, sensori e sistemi di allerta, ma anche modalità di attuazione, risorse finanziarie, monitoraggio, partecipazione dei cittadini e dei proprietari privati. Quando queste misure funzionano in maniera sinergica si osservano risultati migliori in termini di riduzione della superficie bruciata, intensità media del fuoco e tempi di risposta. Questa integrazione verticale (Comune-Regione-Stato-UE) e orizzontale (tra settori e misure) è ciò che trasforma interventi singoli in una vera strategia di resilienza paesaggistica.

Infine, non deve essere sottovalutata l'importanza del monitoraggio e della valutazione continua: il paesaggio è dinamico, le condizioni climatiche evolvono e la vegetazione cresce e muore; misure che oggi sono efficaci, se non manutenute nel tempo, possono perdere la loro utilità.

## 7.1 COME LEGGERE QUESTO ABACO

Questo abaco nasce per fornire agli amministratori locali, tecnici comunali, responsabili di protezione civile, gestori di aree naturali e infrastrutture, uno strumento pratico e scientificamente fondato per orientare la pianificazione e l'attuazione delle azioni di prevenzione incendi. Ogni azione è stata strutturata in modo uniforme per facilitare il confronto immediato tra interventi diversi e per aiutare chi decide a capire quale misura è più adatta al proprio contesto. Per ciascuna di esse sono infatti indicati:

- La componente del rischio che l'azione affronta:
  - *pericolo*
  - *vulnerabilità*
  - *esposizione*
  - *capacità di risposta al disastro*
  - *capacità adattiva*

  Questa distinzione aiuta a capire l'implicazione delle azioni contro gli incendi (vedasi Box 1 per i dettagli)

- Tipi di copertura del suolo dove l'azione è applicabile:
  - aree boschive
  - aree prative, inclusa la landa carsica
  - aree di interfaccia urbano-rurale

- Tipo di strumento di pianificazione dove l'azione può essere inclusa (es. piano regolatore generale comunale, piano paesaggistico regionale, piani di protezione civile, piani di gestione delle aree Natura 2000)

- Quali soggetti sono coinvolti nell'attuazione o nella gestione delle azioni (es. enti pubblici, privati, gestori infrastrutture, consorzi, proprietà collettive, aziende agricole)

Il documento contiene inoltre, per ogni misura, un breve inquadramento scientifico con riferimenti scientifici e normativi, in modo da garantire solidità delle informazioni e facilitare l'integrazione nei piani e nei bandi. L'uso di questo abaco consente quindi ai decisori politici e non solo di comprendere quali misure esistono per ridurre il rischio di incendi boschivi, quali di queste possono essere adottate in modo sinergico e di indirizzare in modo mirato le risorse sugli aspetti più critici del proprio territorio e sugli attori giusti. Tutte queste informazioni sono anche racchiuse nella tabella che si trova in appendice al testo.

## BOX 1 - IL CONCETTO DI RISCHIO

RISCHIO = (PERICOLO × VULNERABILITÀ × ESPOSIZIONE) / (CAPACITÁ DI RISPOSTA × CAPACITÁ ADATTIVA)

**Pericolo =** la probabilità con cui un incendio può accadere (es. vicinanza ad aree ad elevata presenza antropica, accumulo incontrollato di sterpaglie).

**Vulnerabilità =** la suscettibilità di un elemento territoriale ad incendiarsi (es. le conifere sono più infiammabili rispetto a specie a latifoglie e quindi più vulnerabili).

**Esposizione =** il livello di prossimità ad aree potenzialmente infiammabili di popolazione, edifici, infrastrutture (es. case unifamiliari isolate nel mezzo di pinete sono altamente esposte al rischio incendi).

**Capacità di risposta al disastro** = la capacità di intervento immediato per identificare e/o controllare l'incendio (es. sistema di allerta in tempo reale).

**Capacità adattiva** = la capacità di migliorare il sistema di riduzione del rischio di incendi nel lungo termine da un punto di vista legislativo, istituzionale e comportamentale (es. creazione di zone E nel Piano Regolatore Generale Comunale tra zone edificate (A, B, C, D) e zone F.

## 7.2 GLOSSARIO

**CARICO DI COMBUSTIBILE:** Quantità totale di materiale infiammabile presente in un'area. Un carico elevato aumenta l'intensità e la durata di un incendio.

**COMBUSTIBILE:** Insieme dei materiali vegetali vivi o morti che possono bruciare, come foglie secche, aghi, arbusti, legna morta o lettiera del suolo.

**CONTINUITÀ DEL COMBUSTIBILE:** Modo in cui il combustibile è distribuito orizzontalmente (tra aree) e verticalmente (tra suolo, sottobosco e chioma). Maggiore è la continuità, più facilmente il fuoco si propaga.

**NECROMASSA**: Insieme della biomassa morta accumulata nel bosco: legno caduto, rami secchi, foglie, ceppaie e alberi morti in piedi. Rappresenta una componente importante del ciclo ecologico, ma se non gestita aumenta il rischio di incendio e la sua intensità.

**SPOTTING**: Fenomeno per cui frammenti incandescenti (braci, pezzi di corteccia, foglie in fiamme) vengono trasportati dal vento e danno origine a nuovi focolai anche a distanza di centinaia di metri o chilometri dal fronte principale.

**WUI – INTERFACCIA URBANO-RURALE (*WILDLAND URBAN INTERFACE*):** Zona di contatto tra aree naturali e aree edificate, dove il rischio di incendio è maggiore per la vicinanza di vegetazione e abitazioni.

# LE MISURE DI PREVENZIONE DEL RISCHIO INCENDIO BOSCHIVO

# 8 GLI INTERVENTI DIRETTI SUL TERRITORIO

## 8.1 RIMOZIONE SELETTIVA SPECIE AD ALTO RISCHIO INCENDIO

**FUNZIONI DEL RISCHIO:** Vulnerabilità
**COPERTURA DEL SUOLO INTERESSATA:** Bosco
**STRUMENTI DI PIANIFICAZIONE:** Piani antincendio boschivo, Piano Paesaggistico
**SOGGETTI COINVOLTI:** Guardia Forestale

La combustibilità del paesaggio dipende dalla quantità, continuità e tipo di combustibile vegetale. Rimuovendo specie che producono grandi quantità di materiale secco, aghi resiniferi o che favoriscono la continuità verticale, si riduce la probabilità che un fuoco superficiale si trasformi in un incendio di chioma ad alta intensità. La rimozione selettiva è quindi un intervento di gestione forestale che consiste nell'identificare e rimuovere (o ridurre in modo significativo) individui o popolazioni di specie arboree che, per caratteristiche biologiche o strutturali, aumentano il rischio e l'intensità degli incendi in un'area. Lo scopo non è eliminare la copertura arborea, ma modificarne la composizione e la struttura verso comunità vegetali meno infiammabili e più diradate. Sul Carso alcune specie, come ad esempio il pino nero (*Pinus nigra*) e lo scotano (*Cotinus Coggygria*) oltre a soffrire durante gli eventi di siccità estrema e prolungata, sono anche altamente vulnerabili di fronte agli incendi. Tali alberi indeboliti accumulano rami secchi e resinosi che aumentano l'infiammabilità e la probabilità di propagazione dell'incendio alla chioma. Nel Carso, la combinazione di suoli sottili e caldo estremo accentua questi rischi, rendendo il pino nero sia vittima sia fattore di maggiore rischio incendio nelle pinete degradate (Savi et al., 2019). La rimozione può avvenire tramite taglio selettivo, diradamento, o sostituzione con specie meno combustibili, spesso integrata con altri interventi (prescrizioni di fuoco, pascolo, rimboschimenti mirati).

## 8.2 CREAZIONE, MANTENIMENTO E ALLARGAMENTO DELLE PISTE TAGLIAFUOCO

**FUNZIONI DEL RISCHIO:** Vulnerabilità, Capacità di risposta al disastro
**COPERTURA DEL SUOLO INTERESSATA:** Bosco
**STRUMENTI DI PIANIFICAZIONE:** Piani antincendio boschivo, Piano Paesaggistico
**SOGGETTI COINVOLTI:** Guardia Forestale, Comune, privati cittadini, proprietà collettive

Le piste taglia-fuoco, infrastrutture lineari o strisce di terreno in cui la vegetazione è rimossa o modificata, riducono la continuità e la quantità di combustibile vegetale e agevolano l'accesso per le operazioni di spegnimento. Possono andare dal semplice percorso erboso o strada sterrata fino a fasce trattate con diradamento, rimozione del sottobosco e mantenimento periodico. L'obiettivo pratico è quindi limitare o rallentare la propagazione degli incendi.
Per progettare correttamente le piste taglia fuoco bisogna effettuare innanzitutto una mappatura delle aree maggiormente vulnerabili e delle aree maggiormente esposte per poi prevedere i possibili corridoi di propagazione, considerando l'orografia e le direzioni prevalenti del vento. La larghezza di una pista tagliafuoco può variare, da pochi metri fino ad un centinaio in casi estremi, a seconda del tipo di vegetazione (nello specifico dall'altezza e dal rischio di *spotting)* e della conformazione e del terreno. Nel caso di un pendio ad esempio, la larghezza di una pista tagliafuoco dovrà essere maggiore nel caso in cui il fuoco provenga dal basso.

Nella pratica si raccomanda che i tagli selettivi, il diradamento, il controllo della vegetazione lungo piste forestali e margini di radure, siano usati per creare una rete interconnessa di aree a minor combustibile e non solo fasce lineari isolate. Questo approccio permette non solo di ridurre il rischio, ma anche di offrire opportunità di spegnimento in sicurezza e di migliorare la biodiversità creando habitat più vari. Nella progettazione di piste taglia-fuoco è altresì fondamentale integrare sempre misure di controllo di specie invasive in quanto queste possono facilitarne la propagazione fungendo da corridoi di accesso (Shinneman *et al.*, 2019). È consigliato evitare macchine pesanti che scavano o compattano il suolo calcareo; privilegiare tagli manuali selettivi, cippatura leggera e pascolo controllato per ridurre il sottobosco. Questo limita erosione e danno alle superfici rocciose (McKinney *et al.*, 2022). Ai fini di facilitarne il mantenimento, è più pratico istituire un minor numero di piste ma che siano più larghe e più efficaci. Sfruttare la mobilitazione della cittadinanza in occasione dei lavori di pulizia delle piste maggiormente importanti è un metodo efficace per ridurre il tempo ed il costo del mantenimento, oltreché facilitarne l'accettazione da parte della cittadinanza.

## 8.3 CREAZIONE DI AREE CUSCINETTO SENZA O A BASSA VEGETAZIONE ATTORNO AD INFRASTRUTTURE E CENTRI ABITATI

**FUNZIONI DEL RISCHIO:** Pericolo, Esposizione
**COPERTURA DEL SUOLO INTERESSATA:** Bosco, Interfaccia urbano-rurale
**STRUMENTI DI PIANIFICAZIONE:** Piano antincendio boschivo, Piano Paesaggistico, Piano Regolatore Generale
**SOGGETTI COINVOLTI:** Guardia Forestale, Comune

La creazione e manutenzione di fasce di rispetto prive di vegetazione intorno alle abitazioni, ai nuclei abitati e alle principali infrastrutture lineari (ferrovie, strade, elettrodotti, metanodotti) è una delle misure più semplici e al tempo stesso più efficaci per ridurre il rischio che un incendio boschivo raggiunga persone, case e infrastrutture con un conseguente impatto sulla sicurezza della popolazione oltreché ingenti danni economici.
Queste fasce interrompono la continuità orizzontale del materiale infiammabile e riducono la probabilità che scintille e fiamme possano propagarsi alle strutture. In un contesto carsico, caratterizzato da uno strato arboreo contenuto in altezza, una fascia priva di vegetazione o con vegetazione a bassa infiammabilità tra i 10 ed i 30 metri attorno alle abitazioni è una scelta ragionevole ed efficace. Distanze più limitate possono essere adeguate per singole costruzioni isolate se la vegetazione è ben gestita; per nuclei densamente boschivi o in presenza di pendenze elevate si raccomanda invece di aumentare la fascia fino a 30 m.
Per infrastrutture gestite da terzi (ferrovie, società elettriche, strade, metanodotti) è prassi e spesso obbligo contrattuale o normativo che sia il concessionario a mantenere le fasce di rispetto: ciò è giustificato perché sono loro a trarre beneficio dalla mitigazione del rischio (minore interruzione del servizio) e perché possono pianificare manutenzione e interventi con continuità operativa.
L'adozione di separatori fisici (come muretti a secco, cordoli in pietra, barriere non combustibili, reti metalliche) nei punti critici può aiutare a mantenere la fascia libera, impedire la migrazione di materiale vegetale e ridurre l'accumulo di combustibile vicino alle costruzioni o ai cavidotti. Questa combinazione di gestione della vegetazione e barriere fisiche rappresenta uno strumento semplice ma strategico di protezione civile e dovrebbe essere integrata nelle norme locali e nei piani di manutenzione delle infrastrutture. Perché siano davvero utili è essenziale che vengano mantenute regolarmente, rimuovendo periodicamente erbe, arbusti e residui; attraverso piani pluriennali e risorse dedicate.

**BOX 2 - DI QUANTI METRI DOVREBBE ESSERE LA FASCIA DI RISPETTO PER BLOCCARE IL FUOCO?**

La logica dietro la larghezza consigliata delle piste taglia-fuoco è duplice: **(1)** ridurre la energia radiante che arriva all'edificio o all'infrastruttura (la radiazione diminuisce rapidamente con la distanza), e **(2)** abbassare la probabilità che braci incandescenti (che possono essere trasportate dal vento) trovino materiale suscettibile all'accensione vicino alla struttura. La letteratura su spotting mostra che, sebbene in eventi estremi le braci possano volare chilometri, la probabilità e la massa di braci diminuiscono con la distanza; pertanto fasce libere o ben gestite intorno a beni critici riducono significativamente l'esposizione a inneschi da braci e la probabilità di accensione diretta. Studi classici e recenti (Albini 1983; Koo et al. 2010;) spiegano questi meccanismi e quantificano come la distanza e la continuità del combustibile influenzino il rischio di propagazione per spotting. Per questi motivi è consigliato attenersi a larghezze dai 10 m in su.

## 8.4 DESTINAZIONE DI ZONE SICURE PER L'ACCUMULO DELLA NECROMASSA

**FUNZIONI DEL RISCHIO:** Pericolo
**COPERTURA DEL SUOLO INTERESSATA:** Bosco
**STRUMENTI DI PIANIFICAZIONE:** Piano Antincendio Boschivo
**SOGGETTI COINVOLTI:** Guardia Forestale, Comune

La creazione di aree sicure dedicate all'accumulo della necromassa (rami, foglie, tronchi morti) prodotta da diradamenti, pulizie del sottobosco e altre operazioni preventive è essenziale per evitare che il materiale tagliato aumenti il carico di combustibile *in situ*, vanificando l'intervento stesso. Queste zone, idealmente spoglie da vegetazione, pianeggianti e accessibili ai mezzi, devono essere posizionate a distanza di sicurezza dalle abitazioni e dai corridoi di propagazione del fuoco, con cumuli di dimensioni contenute, eventuale cippatura e copertura per ridurre l'essiccamento. Studi su trattamenti di combustibile mostrano che il materiale lasciato in loco senza gestione può innalzare il potenziale energetico degli incendi per diversi anni, mentre la rimozione o concentrazione in siti dedicati riduce l'intensità del fuoco e migliora la sicurezza operativa (Agee and Skinner, 2005; Stephens *et al.*, 2012).
Questa pratica, integrata con cippatura, incendi controllati o utilizzo energetico del materiale, permette di mantenere i benefici ecologici della rimozione del combustibile minimizzando gli effetti collaterali sul rischio incendi.

## 8.5 DIRADAMENTO DI VEGETAZIONE TRAMITE INCENDI CONTROLLATI

**FUNZIONI DEL RISCHIO:** Pericolo, Vulnerabilità
**COPERTURA DEL SUOLO INTERESSATA:** Bosco, Landa carsica
**STRUMENTI DI PIANIFICAZIONE:** Piani antincendio boschivo, Piano paesaggistico
**SOGGETTI COINVOLTI:** Guardia Forestale, Vigili del Fuoco

Gli incendi controllati sono un metodo efficace e poco costoso per ridurre la vulnerabilità di un territorio e ridurre il pericolo che si scateni un incendio di grande intensità. Gli incendi controllati infatti riducono la quantità di combustibile presente nei boschi, rimuovendo lo strato arbustivo del sottobosco consumando la necromassa in accumulo. Può contribuire a mantenere la landa carsica bruciando lo strato arbustivo che la sostituisce, aiutando così a preservarne la biodiversità.
Un incendio controllato è definito come l'applicazione esperta del fuoco a bassa intensità in aree pianificate, attraverso l'uso di personale appositamente addestrato all'uso del fuoco e l'adozione di procedure operative e requisiti definiti in anticipo con linee guida specifiche. Solitamente vengono pianificati da tecnici formati della Guardia Forestale e dei Vigili del Fuoco in condizioni metereologiche a basso rischio di propagazione, non troppo calde ed in assenza di vento. Purtroppo, è possibile che in futuro questa misura sia sempre meno applicabile a causa dell'incremento delle giornate calde e con una maggior imprevedibilità meteorologica (Swain et al., 2023). Tra le diverse controindicazioni, vi è la possibilità che gli incendi controllati favoriscano la colonizzazione dei terreni bruciati da parte di specie pioniere invasive (Keeley, 2006).

## 8.6 CREAZIONE DI BACINI IDRICI ARTIFICIALI PER LO SPEGNIMENTO DEL FUOCO

**FUNZIONI DEL RISCHIO:** Vulnerabilità, Capacità di risposta al disastro
**COPERTURA DEL SUOLO INTERESSATA:** Bosco
**STRUMENTI DI PIANIFICAZIONE:** Piani antincendio boschivo, Piano Regolatore Generale
**SOGGETTI COINVOLTI:** Guardia Forestale, Comune, Vigili del Fuoco, Protezione Civile

La creazione di bacini idrici artificiali rappresenta una misura fondamentale per rendere più efficace e tempestiva la lotta agli incendi boschivi, specialmente in territori come il Carso triestino dove la carenza di corpi d'acqua superficiali limita l'approvvigionamento idrico per i mezzi antincendio. Un bacino artificiale può assumere la forma di una vasca, di un piccolo serbatoio in calcestruzzo o acciaio, o di una cisterna interrata impermeabilizzata, progettata per rendere l'acqua immediatamente disponibile a camion, idranti e, quando le condizioni lo consentono, anche agli elicotteri impegnati nello spegnimento. L'acqua può essere raccolta tramite captazioni di sorgenti naturali intermittenti, convogliamento delle acque piovane nei periodi umidi o approvvigionamento programmato da reti idriche pubbliche o da pozzi laddove idrogeologicamente sostenibile. La capacità di questi bacini deve essere dimensionata per coprire i fabbisogni operativi: la letteratura tecnica suggerisce volumi dell'ordine di almeno 50 $m^3$ per ciascun punto di rifornimento per garantire carichi completi a un'autobotte forestale e, se pensati anche per l'uso da parte di elicotteri, bacini di alcune centinaia di metri cubi con profondità adeguata e facile accesso dall'alto. Per massimizzare l'efficacia operativa i bacini dovrebbero essere distribuiti capillarmente, ad esempio ogni 4–6 km nelle aree di maggior rischio, e collegati ad infrastrutture di spegnimento come idranti, piste di accesso e piazzole di manovra per garantire tempi rapidi di caricamento (Holuša *et al.*, 2021). Tra i vantaggi principali vi è la drastica riduzione dei tempi di approvvigionamento dell'acqua, con conseguente aumento della rapidità e dell'efficacia dell'intervento e potenziale riduzione dell'area bruciata; la possibilità di integrare la funzione antincendio con altri usi (agricoli, pastorali, di raccolta piovana) può favorire l'accettazione sociale e l'economia locale. Tuttavia, questa misura comporta anche limiti e criticità: i costi di costruzione e manutenzione possono essere elevati, soprattutto in ambiente carsico dove serve impermeabilizzare le vasche contro perdite e percolazione; l'evaporazione estiva e il vento possono ridurre rapidamente il volume disponibile.

## 8.7 MANTENIMENTO DELLA LANDA CARSICA

**FUNZIONI DEL RISCHIO:** Vulnerabilità, Capacità adattiva
**COPERTURA DEL SUOLO INTERESSATA:** Landa carsica
**STRUMENTI DI PIANIFICAZIONE:** Piano Paesaggistico, Piano Regolatore Generale
**SOGGETTI COINVOLTI:** Guardia Forestale, Comune, Regione, privati cittadini, proprietà collettive, aziende agricole

Il mantenimento della landa carsica rappresenta una delle misure più efficaci per prevenire la propagazione rapida degli incendi boschivi e al contempo conservare un patrimonio ecologico e culturale di grande valore. Negli ultimi decenni, l'abbandono delle pratiche agro-pastorali tradizionali ha favorito l'avanzata di arbusti e giovani piante legnose che aumentano la continuità dei combustibili, trasformando progressivamente la landa aperta in boscaglia più infiammabile. La pastorizia mirata è una tecnica di gestione che sfrutta gli animali da pascolo per contenere la ricrescita vegetale, mantenendo l'habitat aperto e creando discontinuità orizzontali e verticali del combustibile. Questa pratica non solo abbassa il rischio di incendi intensi ma preserva la biodiversità caratteristica delle praterie carsiche, molte delle quali ospitano specie floristiche rare e insetti specialisti.
Poiché il pascolo estensivo tradizionale è oggi poco redditizio, la sua applicazione come strumento di prevenzione incendi richiede un sostegno pubblico strutturale. Sovvenzioni attraverso i Programmi di Sviluppo Rurale (PSR) o misure agro-ambientali possono remunerare gli allevatori per il servizio ecosistemico offerto, garantendo continuità e qualità nella gestione. Senza un finanziamento stabile, le superfici trattate sono troppo limitate per incidere sul rischio incendi a scala di paesaggio.

**BOX 3 - CHE ANIMALE DA PASCOLO È PIÙ ADATTO PER RIDURRE IL RISCHIO INCENDIO?**

Le specie animali da impiegare vanno scelte anche in base alla composizione vegetale:
- i **caprini** sono particolarmente efficaci nel brucare arbusti e giovani piante legnose, incluse specie invasive, riducendo rapidamente il carico di combustibile arbustivo.
- Gli **ovini** mantengono il prato basso e controllano l'erba fine, limitando la ricrescita di specie erbacee che possono formare uno strato continuo di combustibile durante l'estate.
- i **bovini** possono contribuire a mantenere mosaici aperti e calpestare la lettiera, ma richiedono spazi più ampi, acqua e infrastrutture aggiuntive. Combinare specie diverse, ad esempio greggi miste di capre e pecore, risulta particolarmente efficace nel creare e mantenere discontinuità nel combustibile a diverse altezze.

Gli studi scientifici confermano questi benefici: in contesti mediterranei il pascolo mirato riduce significativamente la biomassa del sottobosco e ritarda la ricolonizzazione arbustiva, aumentando la resilienza al fuoco (Spadoni *et al.*, 2023). In Spagna e nel sud della Francia la reintroduzione del pascolo estensivo in aree abbandonate ha mostrato effetti positivi sia sulla biodiversità prativa che sulla riduzione del rischio incendi (Ruiz-Mirazo et al. 2011; Lasanta *et al.*, 2020)).
L'approccio deve essere adattivo, monitorando nel tempo gli effetti sulla vegetazione e sul rischio incendi e aggiustando carichi e tempi di pascolamento. Così concepita, la pastorizia mirata diventa un investimento pubblico strategico, non un costo, perché fornisce un servizio ecosistemico di prevenzione incendi, preserva un paesaggio culturale unico e sostiene attività economiche locali a rischio di estinzione.

## 8.8 MANTENIMENTO E INNALZAMENTO DEI MURETTI A SECCO

**FUNZIONI DEL RISCHIO:** Pericolo, Vulnerabilità
**COPERTURA DEL SUOLO INTERESSATA:** Bosco, Landa, Interfaccia urbano-rurale
**STRUMENTI DI PIANIFICAZIONE:** Piano Regolatore Generale, Piano paesaggistico
**SOGGETTI COINVOLTI:** Guardia Forestale, Comune, privati cittadini, proprietà collettive

Nel paesaggio carsico triestino e sloveno, i muretti a secco sono parte integrante del patrimonio rurale e paesaggistico, tradizionalmente usati per delimitazioni, confinamenti del bestiame e controllo dell'erosione. Ripristinarli o aumentarne l'altezza laddove in parte crollati offre vantaggi aggiuntivi nella mitigazione del rischio incendio: un muretto in pietra stabile può fungere barriera fisica contro i fuochi radenti, impedendo che fiamme basse e braci si propaghino rapidamente oltre piccole discontinuità del combustibile, rallentando la velocità di avanzamento e creando punti dove intervenire.
Per essere efficaci, i muretti dovrebbero avere un'altezza attorno agli 80-100 cm (o più alta nei tratti con vegetazione abbondante o forte pendenza). È importante che siano continui nei punti critici: attorno a macchie di bosco e nelle fasce di interfaccia urbano-rurale. Oltre ad essere relativamente duraturi, e poco costosi rispetto a strutture più complesse, i muretti a secco contribuiscono a preservare l'identità del paesaggio carsico, ridurre l'erosione nelle forti pendenze, fornire habitat per diverse specie. Naturalmente, la loro erezione è molto laboriosa ed in condizioni estreme (vento forte, spotting, fuochi di chioma) la loro efficacia è limitata.
La collaborazione con i proprietari privati e le proprietà collettive del Carso è cruciale: servono accordi per la manutenzione continua, la ricostruzione da zero nei punti in cui il muro è scomparso, e un coinvolgimento della comunità locale che riconosca anche il valore culturale e storico del muretto, non solo la sua funzione preventiva. Il finanziamento potrebbe venire da misure di gestione dei rischi, fondi rurali, interventi ambientali o programmi legati alla lotta agli incendi.

# 9 PIANIFICARE LA RESILIENZA DEL PAESAGGIO AGLI INCENDI BOSCHIVI

## 9.1 DIVIETO DI RILASCIARE PERMESSI DI EDIFICAZIONE IN AREE VULNERABILI E ISOLATE

**FUNZIONI DEL RISCHIO:** Esposizione, Capacità Adattiva
**COPERTURA DEL SUOLO INTERESSATA:** Interfaccia urbano-rurale
**STRUMENTI DI PIANIFICAZIONE:** Piano Regolatore Generale
**SOGGETTI COINVOLTI:** Comune

Imporre il divieto (o perlomeno forti limitazioni) al rilascio di nuovi permessi di costruzione in aree isolate a elevata vulnerabilità al rischio di incendi è una misura preventiva diretta: evita l'aumento della popolazione e delle infrastrutture esposte, riduce la necessità di interventi d'emergenza in luoghi difficili e mantiene il paesaggio più gestibile dal punto di vista della riduzione del combustibile. Questa politica va inserita nei piani urbanistici e nei piani di prevenzione incendi regionali, con definizione chiara delle aree sulle quali è vietato costruire basata su valutazioni del rischio (WUI, pendenze, accessibilità), garantendo equità e trasparenza tramite consultazioni pubbliche. L'importanza di integrare la pianificazione territoriale con la gestione del rischio incendi è ribadita nelle linee guida europee, che invitano gli Stati e le regioni a considerare restrizioni allo sviluppo nelle aree ad alto rischio come misura strutturale di resilienza (Mauri and Jankavić, 2023).

## 9.2 STANDARD DI UTILIZZO DI MATERIALE IGNIFUGO

**FUNZIONI DEL RISCHIO:** Vulnerabilità, Capacità adattiva
**COPERTURA DEL SUOLO INTERESSATA:** Interfaccia urbano-rurale
**STRUMENTI DI PIANIFICAZIONE:** regolamenti
**SOGGETTI COINVOLTI:** Comune

Stabilire obblighi normativi che impongano l'uso di materiali esterni poco infiammabili (tetti, rivestimenti, infissi, elementi esterni come tettoie e verande) e manufatti anti-brace (griglie alle ventilazioni, giunzioni sigillate) per le nuove costruzioni in zone a rischio è una misura di mitigazione efficace e relativamente poco onerosa rispetto al danno potenziale (Oliveira, 2023). Questi standard devono essere tradotti in regolamenti locali/edilizi e in normative tecniche che siano coerenti con le pratiche di protezione delle costruzioni contro il fuoco: la letteratura tecnica e le normative nazionali indicano che la scelta di materiali non combustibili e la progettazione attenta di dettagli riducono significativamente la probabilità di ignizione da braci e la propagazione del fuoco alle strutture. Le raccomandazioni tecniche e i nuovi regolamenti edilizi nazionali (europei) promuovono proprio l'integrazione di requisiti costruttivi per la protezione dai rischi esterni, compresi i carichi termici e lo *spotting*.

## 9.3 LA FRAMMENTAZIONE DEL PAESAGGIO ED IL MOSAICO DI COMBUSTIBILE

**FUNZIONI DEL RISCHIO:** Vulnerabilità, Capacità adattiva
**COPERTURA DEL SUOLO INTERESSATA:** Bosco, Landa Interfaccia urbano-rurale
**STRUMENTI DI PIANIFICAZIONE:** Piano Regolatore Generale, Piano Paesaggistico, Piano Antincendio
**SOGGETTI COINVOLTI:** Regione, Comune, Guardia Forestale, privati, proprietà collettive, aziende agricole

Progettare e mantenere una mosaicatura del combustibile, ovvero una pianificazione del paesaggio e una gestione del territorio intenzionale che alterna aree soggette ad attività antropica (pascolo, diradamenti, fasce taglia-fuoco, colture agricole) ad aree più naturali, riduce la continuità spaziale del materiale infiammabile e limita l'estensione e l'intensità degli incendi.
L'obiettivo è frammentare le aree ad alta pericolosità in comparti più piccoli, intervallati da aree a basso carico di combustibile, in modo da ostacolare la continuità del fuoco e facilitare le operazioni di spegnimento.
Studi comparativi tra regimi di trattamento diversi mostrano come approcci che privilegiano la frammentazione del combustibile, piuttosto che interventi diretti di gestione tramite fasce tagliafuoco, possono aumentare la resilienza paesaggistica, favorire la biodiversità e rendere meno probabile la formazione di mega-incendi, purché il mosaico sia pianificato su scala compatibile con la dinamica del fuoco locale (Duncan *et al.*, 2015; Lasanta *et al.*, 2022). È importante che le politiche di gestione incentivino dalle fasi pianificatorie, tramite variazioni alla zonizzazione funzionale delle aree ed i piani paesaggistici, lo sviluppo del territorio in un mosaico di usi del suolo diversi ed integrati, tra pascolo, agricoltura con coltivazioni(sia annuali che perenni) e corridoi con fasce prive di vegetazione arborea.

## 9.4 PAGAMENTI PER I SERVIZI ECOSISTEMICI

**FUNZIONI DEL RISCHIO:** Capacità adattiva
**COPERTURA DEL SUOLO INTERESSATA:** Bosco, Landa, Interfaccia urbano-rurale
**STRUMENTI DI PIANIFICAZIONE:** Legislazione e regolamenti
**SOGGETTI COINVOLTI:** Regione, Comune, privati cittadini, proprietà collettive, aziende agricole

I pagamenti per servizi ecosistemici (PES) per la prevenzione degli incendi sono sistemi di incentivi finanziari che pagano i proprietari o i gestori del territorio (privati, enti locali, imprese) per attività misurabili e verificate che producono servizi ambientali utili alla collettività — in questo caso la riduzione del rischio incendio tramite riduzione del carico di combustibile, pascolo estensivo, diradamenti e gestione attiva del sottobosco. L'approccio PES può essere progettato come pagamento diretto per un'azione (pay-for-action), ad esempio pagare un cittadino privato se ha effettuato dei tagli del sottobosco su un'area definita, o come pagamento legato ai risultati (pay-for-outcome), nel caso in cui si paghi non per effettuare un taglio ma per mantenere la copertura vegetale ad una soglia di densità prestabilita. In alternativa, possono essere concepiti come schemi di incentivazione integrati in misure agro-ambientali più ampie; schemi orientati alla gestione attiva (ad es. pagare per pascolo mirato o per fasce taglia-fuoco gestite attivamente) sono più efficaci se vengono identificati indicatori verificabili ed espliciti meccanismi di monitoraggio.
Possono essere compensate tramite PES azioni quali: (i) tagli selettivi e diradamenti mirati a ridurre densità di chioma; (ii) rimozione e valorizzazione della necromassa (cippatura, produzione di biomassa per energia) con pagamento per il servizio di raccolta; (iii) pascolo mirato (con pagamenti al carico di bestiame controllato o per ettaro trattato; (iv) manutenzione di fasce tagliafuoco e infrastrutture pastorali; (v) pagamenti per aziende per il monitoraggio e la certificazione (es. per mantenere standard di gestione sostenibile). Misure di progettazione importanti sono contratti pluriennali (3–5 anni), pagamenti differenziati in base al servizio fornito e soprattutto la misurabilità degli indicatori (come ad esempio la riduzione della biomassa, la densità di arbusti, gli indici di copertura vegetale).

**BOX 4 - FINANZIARE LA MANUTENZIONE DEL BOSCO**

Allocare risorse sufficienti è fondamentale: ciò include dotazioni finanziarie per mezzi, personale antincendio, formazione, infrastrutture (vie di accesso, depositi acqua, centri operativi), manutenzione della vegetazione. Le risorse possono venire stanziate da bilanci nazionali, regionali e comunali nell'ambito di Piani antincendio boschivo, protezione civile. Le Regioni sono competenti per la prevenzione e il coordinamento della lotta agli incendi boschivi, e nei loro piani inseriscono la programmazione delle risorse umane, finanziarie e strumentali necessarie.

A livello europeo, gli strumenti principali che possono finanziare (o facilitare) PES e pagamenti per misure anti-incendio sono il Fondo europeo agricolo per lo sviluppo rurale (FEASR/ Programmi per lo sviluppo rurale (PSR), 2° pilastro della Politica Agricola Comune (PAC)) e i programmi LIFE per progetti dimostrativi o di conservazione. La Commissione EU ha prodotto linee guida per lo sviluppo di schemi pubblici e privati di pagamento per i servizi forestali, evidenziando opportunità di integrazione con fondi regionali e programmi di stato (ad esempio ProForPES e linee guida UE). Le misure di PSR includono strumenti agro-ambientali e investimenti per infrastrutture rurali che possono essere progettati per pagare la riduzione del combustibile (tagli, cippatura, recinzioni per pascolo, abbeveratoi). Tuttavia la letteratura mostra risultati misti sull'efficacia degli stanziamenti PSR nel ridurre il rischio incendi, spesso per problemi di scala, targeting spaziale o insufficiente continuità finanziaria. Per questo gli autori raccomandano schemi PES più mirati e coordinati con la politica antincendio.

A livello nazionale e regionale (esempi e meccanismi pratici): molti Stati membri e regioni attivano misure che, pur non chiamandosi sempre «PES», funzionano come tali — cioè pagamenti o contributi ai proprietari per azioni di pubblica utilità. Esempi concreti i includono programmi che pagano per pascolo mirato, contributi per tagli selettivi e per la rimozione/valorizzazione della biomassa (cippatura, filiere locali), o premi per la certificazione forestale (FSC/PEFC) che include pratiche di prevenzione. Studi su programmi come la rete RAPCA (Rete di aree pascolate come fasce tagliafuoco) in Andalusia mostrano la fattibilità e la sostenibilità di pagamenti che mantengono aree prive di vegetazione arbustiva od arborea gestite tramite pastorizia (Ruiz-Mirazo et al., 2011). Schemi regionali ben progettati (con contratti pluriennali, pagamenti differenziati per intensità di gestione e controlli biometrici) aumentano la partecipazione dei privati e la continuità della gestione.

## 9.5 ZONE DI INTERVENTO FORESTALE

**FUNZIONI DEL RISCHIO:** Pericolo, Vulnerabilità, Capacità adattiva
**COPERTURA DEL SUOLO INTERESSATA:** Bosco, Landa Interfaccia urbano-rurale
**STRUMENTI DI PIANIFICAZIONE:** Piano Regolatore Generale, Piano Paesaggistico, Piano Antincendio
**SOGGETTI COINVOLTI:** Regione, Comune, Guardia forestale, privati, proprietà collettive, aziende agricole

Il modello portoghese delle *Zonas de Intervenção Florestal (ZIF)*, o meglio Zone di Intervento Forestale, è un esempio di come sia possibile facilitare attraverso misure legislative la gestione coordinata di aree boscate frammentate in diverse proprietà. Nei piani di gestione antincendio, il Portogallo ha infatti istituito nelle foreste del Portogallo a più altro rischio incendio le cosiddette ZIF, aree forestali i cui proprietari terrieri si aggregano nella gestione del patrimonio boschivo in modo coordinato e sostenibile. In questo modo, si permette anche a proprietari terrieri privati, senza la disponibilità di risorse economiche e capacità tecniche di poter partecipare alla gestione del bosco. In ciascuna ZIF la gestione è affidata a un unico soggetto (pubblico o privato) scelto dai proprietari, che pianifica e attua misure comuni di riduzione del rischio incendio – come diradamenti, fasce taglia-fuoco o pascolo – con il supporto tecnico ed economico. Gli obiettivi delle ZIF sono la manutenzione del bosco, la riduzione del rischio incendio e la valorizzazione delle risorse forestali.
Le ZIF definiscono obiettivi di gestione del combustibile e affidano la manutenzione ad un unico organismo coordinatore, spesso con accesso a incentivi pubblici e supporto tecnico delle autorità forestali (Valente, Coelho and Soares, 2013). Il quadro normativo portoghese accompagna inoltre strumenti che permettono intervento pubblico in aree private in casi di inadempienza (misure di gestione obbligatoria o intervento sostitutivo) e prevede piani nazionali integrati che sostengono queste misure. Questa esperienza mostra come il coordinamento su base territoriale e la possibilità di misure pubbliche in ambito privato (con regole e compensazioni) siano essenziali per superare la frammentazione fondiaria e rendere possibile la manutenzione forestale su larga scala.

# 10 LA SENSIBILIZZAZIONE E LA PROTEZIONE CIVILE

## 10.1 SISTEMA DI MESSAGGISTICA DI ALLERTA

**FUNZIONI DEL RISCHIO:** Capacità di risposta al disastro
**COPERTURA DEL SUOLO INTERESSATA:** Interfaccia urbano-rurale
**STRUMENTI DI PIANIFICAZIONE:** Piano Protezione Civile
**SOGGETTI COINVOLTI:** Regione, Protezione Civile, Vigili del Fuoco, Agenzia Protezione per l'Ambiente

Sistemi di messaggistica di allerta sono fondamentali per informare tempestivamente la popolazione in caso di gravissime emergenze, includendo scenari di protezione civile come incendi boschivi in casi futuri se ritenuto necessario. Le modalità operative prevedono messaggi di tipo "allerta", "pericolo", "emergenza" a seconda della gravità, identità del rischio, soggetto emittente e contenuti; tali messaggi sono integrati nei piani di allertamento regionale e nazionali, e devono essere chiari, comprensibili, con indicazioni concrete di autoprotezione per la popolazione.
In Italia, è attualmente in fase di sperimentazione in determinati campi, il sistema IT-Alert, disciplinato dalla Direttiva del Presidente del Consiglio del 23 ottobre 2020 e dagli allegati attuativi, è il sistema nazionale di allarme pubblico via messaggi broadcast che la Protezione Civile può utilizzare. La Slovenia sta sviluppando un analogo sistema di messaggistica, SI-Alarm, sperimentato di recente in una fase di test. Il suo utilizzo è previsto anche per catastrofi naturali quali gli incendi boschivi.

Karst Firewall Portal: offre sistema di notifiche email, sms e whatsapp quando viene "triggerato" un evento di allerta generato dai dati dei sensori ambientali (telecamere IR, nasi elettronici, dati satellitari) e dal Algoritmo AI collegato al Fire Weather Index. Il sistema di notifica è destinato agli operatori e coordinatori delle attività emergenziali. Tramite il portale KF5.0 inoltre è possibile monitorare i dati in tempo reale
Infordata in collaborazione con i vigili del fuoco di Borovnica (Slovenia) nel ambito del progetto KF5.0 ha sviluppato la mobile app "Gasilski kviz" "per la consapevolezza sul rischio e gestione incendi" destinata ai bambini e ragazzi (pionirji, mladinci, pripravniki) con strumenti di e-learning & quiz "gamification" e strumenti per segnalare rischi di incendio.

## 10.2 CAMPAGNE DI SENSIBILIZZAZIONE AL RISCHIO INCENDIO E PRESCRIZIONI DI COMPORTAMENTO NEI PERIODI DI MAGGIOR RISCHIO

**FUNZIONI DEL RISCHIO:** Pericolo, Capacità di risposta al disastro, Capacità adattiva
**COPERTURA DEL SUOLO INTERESSATA:** Interfaccia urbano-rurale
**STRUMENTI DI PIANIFICAZIONE:** Piano Protezione Civile
**SOGGETTI COINVOLTI:** Comune, Regione, Protezione Civile, Vigili del Fuoco, Agenzia Protezione Ambiente

La formazione e sensibilizzazione costituiscono un pilastro della resilienza: la Protezione Civile, regioni e enti locali organizzano corsi per volontari AIB, operatori locali, sindaci, imprese e cittadini per promuovere la cultura della prevenzione, la conoscenza dei piani comunali/regionali, l'autoprotezione e le modalità corrette di comportamento durante l'allerta o l'emergenza.
Durante i periodi di pericolosità elevata, vengono prescritte o raccomandate misure obbligatorie o fortemente consigliate per aziende, infrastrutture private, allevatori e cittadini: ad esempio divieto di accendere fuochi aperti, di usare attrezzature che producono scintille, obbligo di pulizia delle aree attorno alle abitazioni, obbligo di tenere mezzi di estinzione pronti. Sebbene non sempre uniformemente applicate, queste prescrizioni fanno parte delle ordinanze stagionalmente emesse in occasione della campagna antincendio boschivo.

# 11 IL RILEVAMENTO IN TEMPO REALE DEGLI INCENDI – *EARLY WARNING SYSTEM*

## 11.1 IL MONITORAGGIO DEL BOSCO CON I SATELLITI

**FUNZIONI DEL RISCHIO:** Pericolo, Capacità di risposta al disastro
**COPERTURA DEL SUOLO INTERESSATA:** Bosco, Landa, Interfaccia urbano-rurale
**STRUMENTI DI PIANIFICAZIONE:** Piano Antincendio Boschivo, Piano Protezione civile
**SOGGETTI COINVOLTI:** Guardia Forestale, Vigili del Fuoco, Protezione Civile, Agenzia per la Protezione dell'Ambiente

Il rilevamento precoce di incendi tramite immagini satellitari utilizza dati da satelliti in orbita, sia a orbita polare che geostazionaria, che acquisiscono immagini multispettrali e termiche per individuare anomalie di calore, cambiamenti nelle firme spettrali della vegetazione o pennacchi di fumo, spesso supportati da intelligenza artificiale per analisi automatica. È stato dimostrato che l'uso di immagini di satellite (Landsat-8) accompagnato da tecniche di apprendimento automatico consente di rilevare incendi attivi con ampia copertura spaziale, utile per territori vasti (Singh, Ang and Srivastava, 2025). Altri lavori (come mostrano che le immagini iperspettrali migliorano la capacità di distinguere incendi reali da false anomalie (alte temperature non legate a fiamme) grazie alla ricchezza dei dati spettrali (Thangavel *et al.*, 2023). I satelliti geostazionari, di nuova generazione, permettono una scansione molto frequente (ogni pochi minuti su Europa), il che consente un avviso di diverse ore prima dell'attivazione delle reti tradizionali, specialmente per incendi di rapida evoluzione. Le risoluzioni spaziali purtroppo non sempre sono sufficientemente elevate per individuare focolai piccoli, e la capacità di rilevamento si abbassa notevolmente in presenza di copertura nuvolosa o interferenze atmosferiche.

Col progetto Karst Firewall 5.0 introduciamo un sistema di monitoraggio integrato ed in in tempo reale dei boschi, che include i dati satellitari provenienti dal sistema europeo Copernicus, dati dalle immagini delle telecamere IR di sorveglianza, dai sensori ambientali (stazioni meteo, nasi elettronici) e dall'algoritmo IA KF5.0.

## 11.2IL MONITORAGGIO DEL BOSCO CON LA VIDEOSORVEGLIANZA

**FUNZIONI DEL RISCHIO:** Pericolo, Capacità di risposta al disastro
**COPERTURA DEL SUOLO INTERESSATA:** Bosco, Landa, Interfaccia urbano-rurale
**STRUMENTI DI PIANIFICAZIONE:** Piano Antincendio Boschivo, Piano Protezione civile
**SOGGETTI COINVOLTI:** Guardia Forestale, Vigili del Fuoco, Protezione Civile, Agenzia per la Protezione dell'Ambiente

Il monitoraggio con telecamere, sia fisse che montate su droni, è una delle forme più dirette ed efficaci di rilevamento precoce degli incendi: le telecamere fisse possono essere installate su torri, pali o edifici lungo il confine boschivo o presso aree WUI per sorveglianza continua, mentre i droni forniscono flessibilità e mobilità per pattugliamenti periodici, soprattutto in zone remote o di difficile accesso. Le immagini ottenute (visibili, RGB; talvolta infrarosse) vengono analizzate con algoritmi di visione artificiale (deep learning, reti neurali, trasformatori) per riconoscere fumo, variazioni cromatiche, scintille, o modelli temporali di fumo nascosto. Uno studio recente ha rilevato che un modello di rilevamento usando telecamere visibili raggiunge un tasso di rilevazione vero-positivo dell'80,4 % con un tasso di falsi positivi molto basso (≈1,13 %) su un grande set di immagini contenenti pennacchi di fumo (Fernandes, Utkin and Chaves, 2023). I droni equipaggiati con fotocamere omnidirezionali o fisheye (angolo di visione ampio) permettono di coprire aree maggiori con meno punti di osservazione fissi, stimando la posizione del focolaio tramite coordinamento GPS dei filmati e inviando allarmi automatici via reti IoT. Limiti: visibilità compromessa (fumo, nebbia, notte o maltempo), consumo energetico, necessità di manutenzione e aggiornamento dei modelli di IA per ridurre falsi allarmi; inoltre, una rete di telecamere/drone richiede investimenti non solo nell'hardware ma anche nell'infrastruttura dati e nelle procedure operative.

## 11.3I SENSORI PER IL RILEVAMENTO IN TEMPO REALE DEGLI INCENDI

**FUNZIONI DEL RISCHIO:** Pericolo, Capacità di risposta al disastro
**COPERTURA DEL SUOLO INTERESSATA:** Bosco, Landa, Interfaccia urbano-rurale
**STRUMENTI DI PIANIFICAZIONE:** Piano Antincendio Boschivo, Protezione civile
**SOGGETTI COINVOLTI:** Guardia Forestale, Vigili del Fuoco, Protezione Civile, Agenzia per la Protezione dell'Ambiente

In un'area vulnerabile come il Carso, l'adozione di reti di sensori intelligenti per la rilevazione precoce degli incendi può rappresentare un salto di qualità nella prevenzione del rischio incendio. I sensori IoT, disposti su pali o su alberi lungo pendii e crinali, possono segnalare la presenza di un incendio fin dalle fasi di combustione senza fiamma, rilevando nell'aria la presenza di gas caratteristici della combustione e della pirolisi, nella fattispecie:

- Monossido di carbonio (CO);
- Anidride carbonica ($CO_2$);
- Idrogeno ($H_2$);
- Composti Organici Volatili (VOC);
- Gas e vapori derivati da pirolisi / decomposizione del combustibile;
- Variazioni locali di umidità e temperatura.

I sensori dovrebbero essere preferibilmente installati ad almeno 2-3 metri d'altezza per evitare danni da fuoco vicino al suolo, umidità e animali. In mancanza di fonti energetiche stabili possono venire alimentati da pannelli solari. Gli intervalli tra sensori dovrebbero essere tali da coprire le aree ad alto rischio, riducendo però il numero totale per contenere il costo e la manutenzione. Rispetto ad altre forme di rilevamento, come ad esempio i satelliti, i sensori hanno il vantaggio di poter abbattere il tempo di allerta, ma il loro alto costo di installazione e manutenzione ne rende difficile l'applicazione in ampi contesti territoriali. Inoltre, sono frequenti i falsi allarmi, dovuti ad esempio a variazioni climatiche improvvise o a fumo proveniente da attività agricole. Studi recenti hanno dimostrato che i modelli dotati di software assistiti dall'IA sono maggiormente capaci di rilevare incendi in tempi più brevi (De Rango *et al.*, 2025).

# 12 BIBLIOGRAFIA

Agee, J.K. and Skinner, C.N. (2005) 'Basic principles of forest fuel reduction treatments', Forest Ecology and Management, 211(1–2), pp. 83–96. Available at: https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.01.034.

Blitch, W., Sovie, A., & Tobin, B. (2023). Predictive modeling of cave entrance locations: Relationships between surface and subsurface morphology. *International Journal of Speleology*, *52*(2), 101–108. https://doi.org/10.5038/1827-806X.52.2.2455

Brown, J. L. (2014). SDMtoolbox: A python-based GIS toolkit for landscape genetic, biogeographic and species distribution model analyses. *Methods in Ecology and Evolution*, *5*(7), 694–700. https://doi.org/10.1111/2041-210X.12200

Brun, P., Zimmermann, N. E., Hari, C., Pellissier, L., & Karger, D. N. (2022). *CHELSA-BIOCLIM+ A novel set of global climate-related predictors at kilometre-resolution* (Versione 1.0) [Geotiff,PDF]. EnviDat. https://doi.org/10.16904/ENVIDAT.332

De Rango, A. et al. (2025) 'Wildfire Early Warning System Based on a Smart CO2 Sensors Network', Sensors, 25(7), p. 2012. Available at: https://doi.org/10.3390/s25072012.

Djabri, A. D., Bouhata, R., Guellouh, S., & Bensekhria, A. (2024). Wildfire Vulnerability Assessment and Mapping Using Remote Sensing, GIS and Weighted Overlay Method in the Eastern Aures in Khenchela, Algeria. *Geoadria*, *28*(2), 191–210. https://doi.org/10.15291/geoadria.4218

Duncan, B.W. et al. (2015) 'Comparing fuels reduction and patch mosaic fire regimes for reducing fire spread potential: A spatial modeling approach', Ecological Modelling, 314, pp. 90–99. Available at: https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.07.013.

Dupuy, J., Fargeon, H., Martin-StPaul, N., Pimont, F., Ruffault, J., Guijarro, M., Hernando, C., Madrigal, J., & Fernandes, P. (2020). Climate change impact on future wildfire danger and activity in southern Europe: A review. *Annals of Forest Science*, *77*(2), 35. https://doi.org/10.1007/s13595-020-00933-5

Fernandes, A.M., Utkin, A.B. and Chaves, P. (2023) 'Automatic early detection of wildfire smoke with visible-light cameras and EfficientDet', Journal of Fire Sciences, 41(4), pp. 122–135. Available at: https://doi.org/10.1177/07349041231163451.

Gigović, & Jakovljević. (2018). GIS Multi-Criteria Analysis for Identifying and Mapping Forest Fire Hazard: Nevesinje, Bosnia and Herzegovina. *Tehnicki Vjesnik - Technical Gazette*, *25*(3). https://doi.org/10.17559/TV-20151230211722

Goleiji, E., Hosseini, S. M., Khorasani, N., & Monavari, S. M. (2017). Forest fire risk assessment-an integrated approach based on multicriteria evaluation. *Environmental Monitoring and Assessment*, *189*(12), 612. https://doi.org/10.1007/s10661-017-6225-7

González-Olabarria, J.-R. and Pukkala, T. (2011) 'Integrating fire risk considerations in landscape-level forest planning', Forest Ecology and Management, 261(2), pp. 278–287. Available at: https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.10.017.

Granceri Bradaschia, M., Giacomo, M., Longato, D., Domen, P., Maragno, D., & Musco, F. (2025). Valutazione del cambiamento climatico sul carso, tra italia e slovenia / ocena podnebnih sprememb na krasu med Italijo in Slovenijo. https://doi.org/10.5281/zenodo.18230894

Holuša, J. et al. (2021) 'A simple model indicates that there are sufficient water supply points for fighting forest fires in the Czech Republic', International Journal of Wildland Fire, 30(6), pp. 428–439. Available at: https://doi.org/10.1071/WF20103.

Karger, D. N., Conrad, O., Böhner, J., Kawohl, T., Kreft, H., Soria-Auza, R. W., Zimmermann, N. E., Linder, H. P., & Kessler, M. (2017). Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *Scientific Data*, *4*(1), 170122. https://doi.org/10.1038/sdata.2017.122

Kim, S. J., Lim, C.-H., Kim, G. S., Lee, J., Geiger, T., Rahmati, O., Son, Y., & Lee, W.-K. (2019). Multi-Temporal Analysis of Forest Fire Probability Using Socio-Economic and Environmental Variables. *Remote Sensing*, *11*(1), 86. https://doi.org/10.3390/rs11010086

Lasanta, T. et al. (2020) 'Soil quality and soil organic carbon storage in abandoned agricultural lands: Effects of revegetation processes in a Mediterranean mid-mountain area', Land Degradation & Development, 31(18), pp. 2830–2845. Available at: https://doi.org/10.1002/ldr.3655.

Lasanta, T. et al. (2022) 'An environmental management experience to control wildfires in the mid-mountain mediterranean area: Shrub clearing to generate mosaic landscapes', Land Use Policy, 118, p. 106147. Available at: https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.106147.

Malczewski, J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: A survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, *20*(7), 703–726. https://doi.org/10.1080/13658810600661508

Maniatis, Y., Doganis, A., & Chatzigeorgiadis, M. (2022). Fire Risk Probability Mapping Using Machine Learning Tools and Multi-Criteria Decision Analysis in the GIS Environment: A Case Study in the National Park Forest Dadia-Lefkimi-Soufli, Greece. *Applied Sciences*, *12*(6), 2938. https://doi.org/10.3390/app12062938

Mauri, E. and Jankavić, M. (2023) Wildfire risk planning and prevention - Innovations in the Mediterranean and beyond. European Forest Institute. Available at: https://doi.org/10.36333/rs8en.

McKinney, S.T. et al. (2022) 'A systematic review of empirical evidence for landscape-level fuel treatment effectiveness', Fire Ecology, 18(1), p. 21. Available at: https://doi.org/10.1186/s42408-022-00146-3.

Merow, C., Smith, M. J., & Silander, J. A. (2013). A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: What it does, and why inputs and settings matter. *Ecography*, *36*(10), 1058–1069. https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2013.07872.x

Mishra, B., Panthi, S., Poudel, S., & Ghimire, B. R. (2023). Forest fire pattern and vulnerability mapping using deep learning in Nepal. *Fire Ecology*, *19*(1), 3. https://doi.org/10.1186/s42408-022-00162-3

Oliveira, F.P. (2023) 'Forest Fires and Building Rules', Civil Engineering Research Journal, 14(1). Available at: https://doi.org/10.19080/CERJ.2023.14.555878.

Paudel, G., Pandey, K., Lamsal, P., Bhattarai, A., Bhattarai, A., & Tripathi, S. (2024). Geospatial forest fire risk assessment and zoning by integrating MaxEnt in Gorkha District, Nepal. *Heliyon*, *10*(11), e31305. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31305

Phillips, S. J. (2017). *A Brief Tutorial on Maxent* (p. 39). http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/

Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, *190*(3–4), 231–259. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026

Phillips, S. J., & Dudík, M. (2008). Modeling of species distributions with Maxent: New extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, *31*(2), 161–175. https://doi.org/10.1111/j.0906-7590.2008.5203.x

Phillips, S. J., Dudík, M., Elith, J., Graham, C. H., Lehmann, A., Leathwick, J., & Ferrier, S. (2009). Sample selection bias and presence-only distribution models: Implications for background and pseudo-absence data. *Ecological Applications*, *19*(1), 181–197. https://doi.org/10.1890/07-2153.1

RAFVG - DC production, trade, cooperation, agricultural and forest resources – Regional Forestry Corps Service. (2024). *Fire beginning point* [Dataset].

Ruiz-Mirazo, J., Robles, A.B. and González-Rebollar, J.L. (2011) 'Two-year evaluation of fuelbreaks grazed by livestock in the wildfire prevention program in Andalusia (Spain)', Agriculture, Ecosystems & Environment, 141(1), pp. 13–22. Available at: https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.02.002.

Saaty, T. l. (2002). *DECISION MAKING WITH THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS*. *9*(3), 215–229.

Shinneman, D.J. et al. (2019) 'The ecological uncertainty of wildfire fuel breaks: examples from the sagebrush steppe', Frontiers in Ecology and the Environment, 17(5), pp. 279–288. Available at: https://doi.org/10.1002/fee.2045.

Singh, H., Ang, L.-M. and Srivastava, S.K. (2025) 'Active wildfire detection via satellite imagery and machine learning: an empirical investigation of Australian wildfires', Natural Hazards, 121(8), pp. 9777–9800. Available at: https://doi.org/10.1007/s11069-025-07163-w.

Sivrikaya, F., & Küçük, Ö. (2022). Modeling forest fire risk based on GIS-based analytical hierarchy process and statistical analysis in Mediterranean region. *Ecological Informatics*, *68*, 101537. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101537

Spadoni, G.L. et al. (2023) 'Active governance of agro-pastoral, forest and protected areas mitigates wildfire impacts in Italy', Science of The Total Environment, 890, p. 164281. Available at: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164281.

Starns, H.D. et al. (2019) 'Recoupling fire and grazing reduces wildland fuel loads on rangelands', Ecosphere, 10(1), p. e02578. Available at: https://doi.org/10.1002/ecs2.2578.

Stephens, S.L. et al. (2012) 'The Effects of Forest Fuel-Reduction Treatments in the United States', BioScience, 62(6), pp. 549–560. Available at: https://doi.org/10.1525/bio.2012.62.6.6.

Sušnik, A., Vlahović, Ž., Moderc, A., & Habič, B. (2023). *Prilagajanje podnebnim spremembam. [PP14] Kmetijske suše*. Agencija RS za okolje. https://kazalci.arso.gov.si/sl/content/kmetijske-suse-0

Thangavel, K. et al. (2023) 'Autonomous Satellite Wildfire Detection Using Hyperspectral Imagery and Neural Networks: A Case Study on Australian Wildfire', Remote Sensing, 15(3), p. 720. Available at: https://doi.org/10.3390/rs15030720.

Valente, S., Coelho, C. and Soares, J. (no date) 'Forest Intervention Areas (ZIF): A New Approach for Non-Industrial Private Forest Management in Portugal'.

Vilar, L., Gómez, I., Martínez-Vega, J., Echavarría, P., Riaño, D., & Martín, M. P. (2016). Multitemporal Modelling of Socio-Economic Wildfire Drivers in Central Spain between the 1980s and the 2000s: Comparing Generalized Linear Models to Machine Learning Algorithms. *PLOS ONE*, *11*(8), e0161344. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0161344

Yang, X., Jin, X., & Zhou, Y. (2021). Wildfire Risk Assessment and Zoning by Integrating Maxent and GIS in Hunan Province, China. *Forests*, *12*(10), 1299. https://doi.org/10.3390/f12101299