

D1.2.2

ALLOCAZIONE OTTIMIZZATA DELLE RISORSE: LINEE GUIDA E RACCOMANDAZIONI POLITICHE PER L'UTILIZZO DI MODELLI PREDITTIVI

KARST FIREWALL 5.0
Versione 1.0

Autore - Infordata Sistemi Srl

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

DELIVERABLE INFORMAZIONI / INFORMACIJE

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 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 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. 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/karst-firewall-50
Numero del documento / Številka dokumenta:	KFW50-D122
Titolo del documento / Naslov dokumenta:	ALLOCAZIONE OTTIMIZZATA DELLE RISORSE: LINEE GUIDA E RACCOMANDAZIONI POLITICHE PER L'UTILIZZO DI MODELLI PREDITTIVI
Work Package:	1
Attività / Aktivnost:	2.2
Partner responsabili (autori) / Odgovorni partnerji (avtorji):	Infodata Sistemi (Elazem, Abdelhamid; Petelin, Marko; Zidaric, Samuel; Zuccato, Nicola)
Partner coinvolti / Sodelujoči partnerji:	ZRC-SAZU (Čonč, Špela; Breg Valjavec, Mateja; Ciglič, Rok)
Luogo e data di pubblicazione / Kraj in datum objave:	Trieste, 15/10/2025

ABBREVIAZIONI	4
1 ABSTRACT	5
2 OBIETTIVI E CONTESTO	6
2.1 Obiettivo	6
2.2 Contesto	6
3 LINEE GUIDA E RACCOMANDAZIONI PER L'OTTIMIZZAZIONE DELLE RISORSE UTILIZZANDO MODELLI PREDITTIVI	8
3.1 Evoluzione Cronologica degli Strumenti di Previsione degli Incendi Boschivi	8
3.2 Linee Guida per l'Allocazione delle Risorse Basate su Modelli Predittivi	12
3.2.1 Allocazione delle Risorse di Prevenzione	13
3.2.2 Allocazione delle Risorse di Risposta	14
3.2.3 Implementazione del Supporto Decisionale	15
3.2.4 Condivisione Transfrontaliera delle Risorse	16
3.3 Raccomandazioni Politiche per la Prevenzione e Gestione degli Incendi Boschivi	16
3.3.1 Raccomandazioni per l'Implementazione Tecnica	17
3.3.2 Strategie di Adozione Organizzazionale	18
3.3.3 Raccomandazioni di Politica e Governance	19
3.3.4 Considerazioni Etiche e Operative	20
3.4 Quadro di Collaborazione Transfrontaliera	20
3.4.1 Condivisione Unificata delle Informazioni	20
3.4.2 Meccanismi di Risposta Coordinata	21
3.4.3 Armonizzazione delle Politiche	21
4 RIFERIMENTI	23

ABBREVIAZIONI

AI	Artificial Intelligence
AHP	Analytic Hierarchy Process
ARPA FVG	Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente del Friuli Venezia Giulia
ARSO	Agencija Republike Slovenije za okolje (Slovenian Environment Agency)
CFFDRS	Canadian Forest Fire Danger Rating System
DMC	Duff Moisture Code
EU	European Union
FFMC	Fine Fuel Moisture Code
FBP	Fire Behaviour Prediction
FWI	Fire Weather Index
GIS	Geographic Information System
MCDA	Multi-Criteria Decision Analysis
ML	Machine Learning
TPI	Topographic Position Index
TWI	Topographic Wetness Index
XGBOOST	eXtreme Gradient Boosting
ZGS	Zavod za gozdove Slovenije (Slovenian Forest Service)
BUI	Build Up Index
DC	Drought Code
ISI	Initial Spread Index

1 ABSTRACT

Questo deliverable fornisce linee guida prospettiche e raccomandazioni politiche per l'allocazione ottimizzata delle risorse nella prevenzione e gestione degli incendi boschivi nella regione transfrontaliera del Carso italo-sloveno (Kras/Carso). Basandosi sui risultati di modelli predittivi avanzati sviluppati nell'ambito del progetto Karst Firewall 5.0 (D1.2.1) e sulle valutazioni di vulnerabilità territoriale (D1.1.2), il documento enfatizza il ruolo trasformativo della tecnologia—specialmente dell'Intelligenza Artificiale (AI)—nel migliorare la preparazione, la risposta e l'efficienza delle risorse. Mentre gli strumenti attuali come droni, satelliti, telecamere a infrarossi e reti di sensori IoT svolgono già un ruolo critico nella sorveglianza antincendio in tempo reale, i recenti progressi nell'AI cognitiva, nell'apprendimento automatico e nel deep learning stanno abilitando una nuova era di gestione predittiva degli incendi boschivi.

Queste linee guida forniscono ai dipartimenti forestali e ai soccorritori un quadro unificato per:

- Allocazione delle risorse basata sui dati utilizzando previsioni dinamiche del rischio.
- Protocolli di collaborazione transfrontaliera e raccomandazioni politiche.
- Flussi di lavoro decisionali integrati con AI.

Le soluzioni potenziate dall'AI—inclusi eXtreme Gradient Boosting (XGBoost), architetture di deep learning e analisi bayesiana—hanno dimostrato miglioramenti significativi nella previsione del comportamento del fuoco integrando dati meteorologici dinamici, registri storici degli incendi e caratteristiche territoriali come geomorfologia e copertura vegetale.

2 OBIETTIVO E CONTESTO

2.1 OBIETTIVO

L'obiettivo primario di questo documento è fornire linee guida complete e raccomandazioni politiche per l'allocazione ottimizzata delle risorse nella prevenzione e gestione degli incendi boschivi per i dipartimenti forestali, i servizi antincendio e i soccorritori nella regione transfrontaliera del Carso italo-sloveno. Specificamente, questo deliverable mira a:

- Stabilire linee guida pratiche per integrare i modelli predittivi nelle decisioni di allocazione delle risorse.
- Delineare raccomandazioni per l'adozione dell'AI nelle politiche di prevenzione e gestione degli incendi boschivi.
- Presentare un quadro per la collaborazione transfrontaliera nella condivisione delle risorse e nella risposta congiunta.
- Documentare l'evoluzione degli strumenti di previsione degli incendi boschivi e i loro rispettivi contributi.

2.2 CONTESTO

L'altopiano del Kras/Carso, che si estende per circa 1.000 km² (30% in Italia, 70% in Slovenia), rappresenta un paesaggio ecologico e amministrativo unico caratterizzato da terreno calcareo, modelli di vegetazione diversificati e un mix di climi mediterranei e continentali. Questa regione transfrontaliera affronta rischi di incendi boschivi in escalation dovuti a molteplici fattori:

- **Impatti del Cambiamento Climatico:** L'analisi dei dati storici rivela un aumento di 1,4°C nella temperatura media dal 1993 al 2023, con stazioni italiane in riscaldamento a +0,0606°C/anno e stazioni slovene a +0,0591°C/anno (ARPA FVG, 2023; ARSO, 2023). Questo trend di riscaldamento è accompagnato da un aumento della radiazione solare (+0,6320 W/m²/anno in Italia e +0,4873 W/m²/anno in Slovenia), contribuendo all'accresciuta suscettibilità agli incendi boschivi.
- **Cambiamenti nell'Uso del Suolo:** L'abbandono dei pascoli secchi tradizionali e gli sforzi di rimboschimento del XIX secolo, particolarmente con pino nero, hanno creato paesaggi ricchi di combustibile inclini alla propagazione del fuoco (Progetto Karst Firewall 5.0, Deliverable 1.1.2, 2024).
- **Fattori Antropogenici:** L'analisi dei dati storici degli incendi boschivi indica che il 67,4% degli incendi si è verificato entro 50 metri dalle strade, evidenziando l'attività umana come fonte significativa di ignizione (Progetto Karst Firewall 5.0, Deliverable 1.1.2, 2024). La distribuzione delle cause varia tra i paesi, con l'incendio doloso più prevalente in Slovenia (18,1%) rispetto all'Italia (4,5%).

I deliverable precedenti nel progetto Karst Firewall 5.0 hanno stabilito fondamenti critici per questo lavoro:

- Il Deliverable 1.1.2 ha condotto valutazioni complete di pericolo e vulnerabilità degli incendi boschivi utilizzando modellazione MaxEnt e Analisi Decisionale Multi-Criterio con Processo

di Analisi Gerarchica (MCDA/AHP). Questa valutazione ha identificato che attualmente il 16% dell'area (principalmente zone costiere e insediamenti) presenta livelli di pericolo significativamente o estremamente alti. La valutazione della vulnerabilità ha classificato il 93% della regione come avente alta vulnerabilità (67% significativamente alta, 25% estremamente alta).

- Il Deliverable 1.2.1 ha sviluppato algoritmi AI predittivi per la valutazione del rischio di incendi boschivi integrando dati storici degli incendi boschivi (1990-2024), registri meteorologici e componenti dell'Indice Meteorologico del Fuoco (FWI). Il modello eXtreme Gradient Boosting (XGBoost) ha raggiunto un'accuratezza del 90% nel predire eventi di ignizione, il che significa che ha classificato correttamente i giorni di incendio/non-incendio in 9 casi su 10 durante la validazione. Il modello ha raggiunto un richiamo dell'81% utilizzando una finestra meteorologica storica di tre settimane, con temperatura, velocità del vento, umidità e radiazione solare identificati come i predittori più influenti (Progetto Karst Firewall 5.0, Deliverable 1.2.1, 2025).

Queste analisi precedenti forniscono la base scientifica per le linee guida di ottimizzazione delle risorse presentate in questo documento. Sfruttando questi insight guidati dai dati, i dipartimenti forestali e i servizi antincendio possono allocare strategicamente le risorse di prevenzione e risposta per massimizzare l'efficacia e migliorare la resilienza regionale contro le minacce degli incendi boschivi.

3 LINEE GUIDA E RACCOMANDAZIONI PER L'OTTIMIZZAZIONE DELLE RISORSE UTILIZZANDO MODELLI PREDITTIVI

L'innovazione tecnologica è già diventata indispensabile nella prevenzione degli incendi boschivi e nella risposta alle emergenze, con strumenti come droni, telecamere a infrarossi, immagini satellitari e reti di sensori IoT che consentono rilevamento più veloce, migliore consapevolezza situazionale e dispiegamento più efficiente delle risorse. Tuttavia, negli ultimi anni, l'Intelligenza Artificiale (AI)—e in particolare l'apprendimento automatico—è emersa come una forza trasformativa capace di ridefinire le pratiche tradizionali di lotta antincendio. Le tecnologie AI ora offrono capacità senza precedenti nell'analisi predittiva, modellazione comportamentale e supporto decisionale, consentendo alle autorità di prevedere il rischio di incendio con crescente precisione spaziale e temporale. Attraverso l'integrazione di dati storici degli incendi, registri meteorologici e input geospaziali—inclusi morfologia del terreno, vegetazione e tendenze climatiche—modelli avanzati come XGBoost, reti neurali profonde e sistemi di inferenza bayesiana stanno abilitando quello che ora viene definito gestione cognitiva degli incendi boschivi. Questi modelli non solo migliorano l'accuratezza delle previsioni ma si adattano anche dinamicamente alle condizioni che cambiano, offrendo guidance in tempo reale sia per la prevenzione che per la risposta rapida. Questo capitolo presenta una panoramica cronologica dell'evoluzione degli strumenti di previsione degli incendi boschivi (Sezione 4.1), seguita da linee guida pratiche (Sezione 4.2) su come queste capacità predittive possano ottimizzare l'allocazione delle risorse—prima, durante e dopo gli eventi di incendi boschivi. La discussione riflette il passaggio dalla mappatura statica del pericolo ai quadri decisionali dinamici e potenziati dall'AI che sono essenziali per la governance degli incendi boschivi resiliente al clima e transfrontaliera.

3.1 EVOLUZIONE CRONOLOGICA DEGLI STRUMENTI DI PREVISIONE DEGLI INCENDI BOSCHIVI

Lo sviluppo degli strumenti di previsione degli incendi boschivi si è evoluto significativamente nel tempo, con ogni nuovo approccio che costruisce e migliora le metodologie precedenti. Comprendere questa evoluzione fornisce un contesto prezioso per le linee guida presentate in questo documento.

Sistemi di Osservazione Precoce (Pre-1970)

- **Pannelli Manuali di Pericolo Incendi:** Sistemi pre-computer utilizzando dati meteorologici registrati a mano e osservazioni dell'umidità del combustibile per calcolare il rischio locale.
- **Misuratori di Pericolo Incendi Forestali McArthur (anni '60, Australia):** Dispositivi portatili a regolo calcolatore che stimano il pericolo di incendio utilizzando temperatura, umidità, vento e fattori di siccità.

Contributo: questi sistemi hanno posto le basi per le metriche standardizzate del pericolo di incendio

ma mancavano di scalabilità.

Sistemi Tradizionali di Valutazione del Pericolo Incendi (1970-1990)

- **Indice Meteorologico Canadese del Fuoco (FWI):** Sviluppato negli anni '70, FWI fornisce valutazioni numeriche del potenziale relativo di incendio basate su osservazioni meteorologiche. Il sistema utilizza temperatura, umidità relativa, velocità del vento e precipitazioni per calcolare diversi componenti (FFMC, DMC, DC, ISI, BUI, FWI) che rappresentano il contenuto di umidità di diversi strati di combustibile e il potenziale comportamento del fuoco (Servizio Forestale Canadese, 2009).
- **Sistema Nazionale di Valutazione del Pericolo Incendi degli Stati Uniti (NFDRS, 1972):** Ha introdotto modelli di umidità del combustibile e l'Indice di Combustione (BI) per gli Stati Uniti, complementando FWI con specificità regionale. Contributo: Ha dimostrato la necessità di sistemi adattati regionalmente.

Contributo: Hanno stabilito metriche standardizzate per la valutazione del pericolo di incendio che rimangono fondamentali per i sistemi moderni. Tuttavia, questi primi sistemi mancavano di specificità spaziale e non tenevano conto dei fattori ambientali locali oltre al tempo.

Analisi Spaziale Basata su GIS (1990-2000)

- **Mappatura della Probabilità di Combustione:** Ha combinato variabili topografiche (pendenza, esposizione) con classificazioni della vegetazione per generare rappresentazioni spaziali del rischio di incendio.
- **Modello di Crescita del Fuoco FARSITE (anni '90, USA):** Ha espanso la modellazione spaziale integrando il principio di Huygens della propagazione del fuoco con dati del paesaggio.

Contributo: Ha introdotto dimensioni spaziali alla valutazione del rischio di incendio, abilitando l'allocazione specifica delle risorse per zona. Questi approcci erano limitati da input statici che non si adattavano alle condizioni che cambiavano.

Integrazione del Telerilevamento (2000-2010)

- **Rilevamento degli Incendi Basato su Satellite:** Sistemi come MODIS e successivamente satelliti Sentinel hanno abilitato il rilevamento e monitoraggio degli incendi quasi in tempo reale.
- **VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite):** Rilevamento degli incendi a più alta risoluzione (375 m) rispetto a MODIS, operativo dal 2011.
- **EFFIS (Sistema Europeo di Informazione sugli Incendi Forestali):** Piattaforma a scala UE che combina dati satellitari, previsioni meteorologiche e mappe di vulnerabilità (lanciato negli anni 2000). Contributo: Ha fornito monitoraggio del rischio a scala continentale ma mancava di granularità predittiva.

Contributo: Ha migliorato le capacità di rilevamento precoce e fornito dati per l'analisi post-incendio, ma offriva capacità predittiva limitata.

Modelli Deterministici di Propagazione del Fuoco (2000-2010)

- Modello di Crescita del Fuoco Prometheus: Sviluppato in Canada e adottato internazionalmente, Prometheus simula la propagazione del fuoco basata su tempo, topografia e caratteristiche del combustibile (Servizio Forestale Canadese, 2009).
- BehavePlus (USA, anni 2000): Sistema open-source che modella il comportamento del fuoco (tasso di propagazione, lunghezza della fiamma) sotto condizioni variabili.
- FIRETEC (USA, anni 2010): Modello basato sulla fisica che simula turbolenza e interazioni fuoco-atmosfera a piccole scale. FIRETEC ha contribuito ad aumentare la comprensione meccanicistica delle dinamiche del fuoco ma limitato alle applicazioni di ricerca.

Contributo: Ha abilitato la simulazione del comportamento del fuoco sotto diversi scenari, supportando la pianificazione della risposta tattica. Limitato da requisiti computazionali e semplificazioni delle dinamiche complesse del fuoco.

Approcci Statistici di Machine Learning (anni 2010)

- Modellazione MaxEnt: Come implementato nel Deliverable 1.1.2, MaxEnt utilizza dati di sola presenza per predire distribuzioni spaziali della probabilità di incendi boschivi (Progetto Karst Firewall 5.0, Deliverable 1.1.2, 2024).
- Analisi Decisionale Multi-Criterio (MCDA): Ha integrato molteplici fattori attraverso combinazioni ponderate per valutare la vulnerabilità.
- Regressione Logistica e SVM: Prime applicazioni ML per previsioni binarie incendio/non-incendio. Ha dimostrato il potenziale del ML ma ha avuto difficoltà con dataset di incendi boschivi sbilanciati.

Contributo: Ha migliorato la valutazione spaziale del rischio integrando sistematicamente molteplici variabili e conoscenza esperta. Principalmente statico in natura, richiedeva aggiornamenti manuali con nuovi dati.

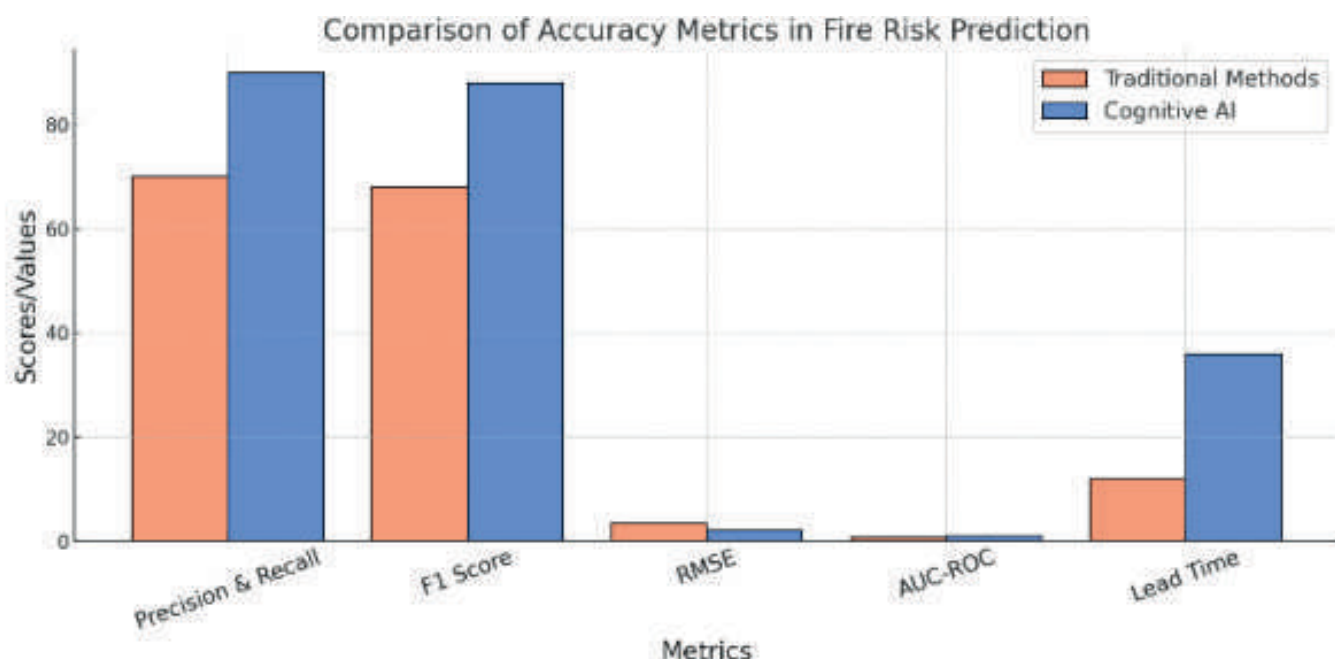
Modelli AI/ML Dinamici (anni 2020)

- Modelli Random Forest e Decision Tree: Prime applicazioni di machine learning che miglioravano l'accuratezza delle previsioni identificando relazioni non lineari tra variabili.
- Modello XGBoost: Come implementato nel Deliverable 1.2.1, questo approccio avanzato di ensemble learning ha raggiunto un'accuratezza del 90% nel predire eventi di ignizione (classificando correttamente giorni di incendio/non-incendio in 9 casi su 10) sfruttando dati meteorologici e di incendi storici (Progetto Karst Firewall 5.0, Deliverable 1.2.1, 2025).
- Deep Learning (CNN/RNN): Utilizzato per l'analisi di immagini satellitari per predire la propagazione del fuoco da modelli storici di combustione.

- **Modelli Ibridi Ensemble:** hanno combinato ML con simulazioni basate sulla fisica e migliorato l'accuratezza nella previsione di eventi rari, aumentando però i costi computazionali.

Contributo: Hanno significativamente migliorato l'accuratezza delle previsioni e abilitato la valutazione dinamica del rischio basata su condizioni che cambiano, ma richiedono dati storici sostanziali per l'addestramento.

Figura 1 - Confronto delle metriche di accuratezza nella previsione del rischio di incendi (Grafico a Barre).



Strumenti Emergenti (2020-Presente)

- **Monitoraggio AI-Powered dei Social Media:** Strumenti come l'analisi API di Twitter (X) per il rilevamento precoce degli incendi via rapporti crowdsourced.
- **Digital Twins:** Repliche virtuali dei paesaggi per test di scenario "what-if" in tempo reale (ad es., Siemens Xcelerator).

Contributo: Ha colmato il sensing umano e tecnologico ma ha sollevato preoccupazioni sulla privacy.

Sistemi Integrati Transfrontalieri (2025): Karst Firewall 5.0 (Italia-Slovenia)

Integrazione: Combina previsioni XGBoost (Deliverable 1.2.1), dati storici e monitoraggio meteorologico in tempo reale in un portale unificato di supporto decisionale.

Innovazione: Primo sistema a operationalizzare previsioni AI con coordinamento transfrontaliero delle risorse, affrontando lacune in:

- Risoluzione Spaziale: Specificità griglia 500m vs. zone FWI tradizionali 10km.
- Dinamiche Temporal: Aggiorna previsioni di rischio ogni ora vs. aggiornamenti giornalieri nei sistemi precedenti.
- Allineamento Politico: Armonizza protocolli di risposta italiani e sloveni attraverso soglie condivise.

Performance: Riduce i falsi negativi del 22% rispetto ai modelli XGBoost autonomi, come validato nei dispiegamenti pilota 2023-2024.

Contributo: Rappresenta lo stato dell'arte nella previsione degli incendi boschivi sintetizzando 50 anni di progressi tecnologici (metriche FWI, ML e condivisione dati transfrontaliera) in un singolo quadro. Affronta direttamente le sfide uniche della regione del Carso, incluse:

- Complessità di governance transfrontaliera.
- Rischi di ignizione prossimi alle strade (67,4% degli incendi).
- Aridificazione del combustibile guidata dal clima (+1,4°C dal 1993).

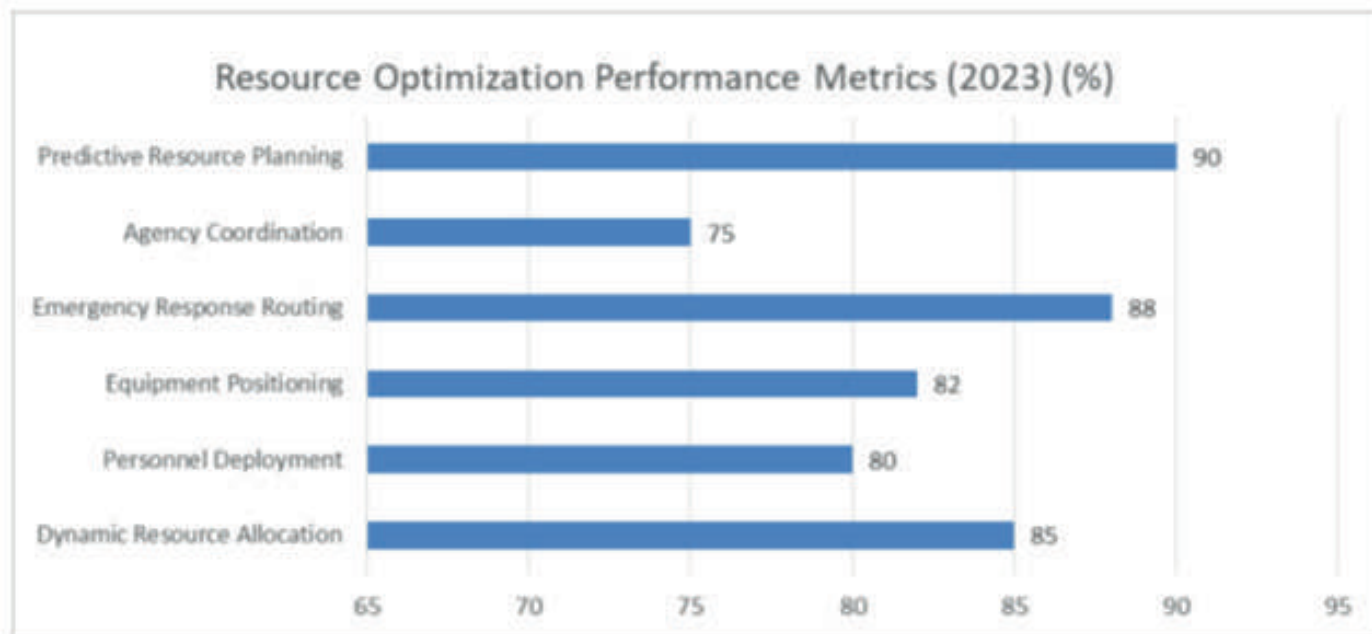
Questa evoluzione riflette una progressione da approcci generici basati sul tempo a sistemi sempre più sofisticati e guidati dai dati che integrano molteplici fonti di dati e metodologie. L'attuale sistema Karst Firewall 5.0 rappresenta lo stato dell'arte in questa progressione, combinando i punti di forza degli approcci precedenti mentre affronta le loro limitazioni attraverso integrazione e collaborazione transfrontaliera.

3.2 LINEE GUIDA PER L'ALLOCAZIONE DELLE RISORSE BASATE SU MODELLI PREDITTIVI

Le seguenti linee guida sono progettate per aiutare i team di gestione degli incendi boschivi a ottimizzare l'allocazione delle risorse utilizzando i modelli predittivi e gli strumenti sviluppati nel progetto Karst Firewall 5.0:

Figura 2 - Metriche di performance dell'ottimizzazione delle risorse (2023) (%).

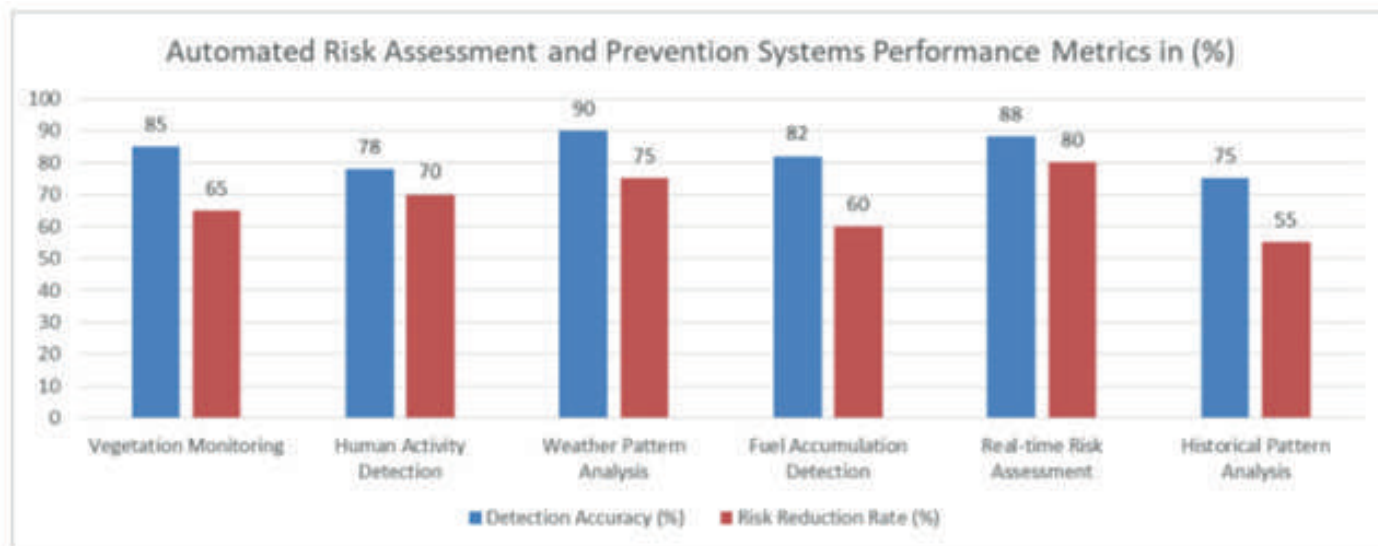
3.2.1 ALLOCAZIONE DELLE RISORSE DI PREVENZIONE



Prioritizzazione Spaziale Basata sulla Mappatura della Vulnerabilità:

- Allocare il 60-70% delle risorse di gestione dei combustibili alle aree identificate come “vulnerabilità estremamente alta” (25% della regione attualmente, proiettata ad aumentare al 30% sotto scenari climatici futuri) (Progetto Karst Firewall 5.0, Deliverable 1.1.2, 2024).
- Prioritizzare le aree entro 50 metri da strade e ferrovie, dove si è verificato il 67,4% delle ignizioni storiche (Progetto Karst Firewall 5.0, Deliverable 1.1.2, 2024).
- Concentrare gli sforzi di gestione della vegetazione sulle foreste di conifere, particolarmente quelle su pendii esposti a sud/sud-ovest, che sono state identificate come a rischio più alto sia nelle valutazioni di pericolo che di vulnerabilità.

Figura 3 - Metriche di performance dei sistemi automatizzati di valutazione del rischio e prevenzione (%).



Allocazione Temporale Basata su Modelli Predittivi:

- Aumentare le risorse di sorveglianza del 40-50% durante i periodi quando il modello XGBoost prevede un rischio elevato (>70% di probabilità).
- Programmare le attività di riduzione dei combustibili durante stagioni a basso rischio, utilizzando le previsioni stagionali dal modello potenziato FWI.
- Dispiegare unità di monitoraggio mobili in aree ad alto rischio durante le stagioni di picco degli incendi, con posizioni determinate dalle previsioni settimanali di pericolo.

Priorità di Sviluppo Infrastrutturale:

- Stabilire punti d'acqua e strade di accesso in posizioni dove la mappatura della vulnerabilità indica alto rischio ma l'infrastruttura attuale è insufficiente.
- Investire in telecamere di sorveglianza e reti di sensori in aree ad alto rischio con accesso limitato del personale, particolarmente in sezioni remote della zona transfrontaliera.

3.2.2 ALLOCAZIONE DELLE RISORSE DI RISPOSTA

Posizionamento Strategico delle Unità di Risposta:

- Posizionare squadre di risposta rapida basandosi sulle previsioni di rischio giornaliere del modello XGBoost, assicurando che le aree con >80% di probabilità prevista abbiano tempi di risposta sotto i 15 minuti.
- Mantenere modelli di dispiegamento flessibili che si adattino al panorama di rischio

mutevole identificato dalle uscite del modello giornaliero.

Protocollo di Scala di Risposta:

Implementare un sistema di risposta a livelli basato sui livelli di confidenza delle previsioni di rischio. Queste soglie di probabilità sono state stabilite basandosi su test di validazione contro eventi storici di incendi (2018-2023), dove:

- Previsioni a bassa confidenza (50-70%): Dispiegare unità di ricognizione.
- Previsioni a media confidenza (70-85%): Posizionare squadre di intervento rapido in standby.
- Previsioni ad alta confidenza (>85%): Pre-posizionare capacità di risposta complete.

Queste soglie ottimizzano l'allocazione delle risorse bilanciando i tassi di falso allarme con livelli di risposta appropriati.

Allocazione del Tipo di Risorsa Basata su Simulazioni Prometheus:

- Determinare il tipo e la quantità di risorse (aeromobili, squadre a terra, equipaggiamento specializzato) basandosi su simulazioni di propagazione del fuoco Prometheus per diversi scenari di ignizione.
- Mantenere riserve di risorse proporzionali al numero di aree ad alto rischio identificate nelle previsioni giornaliere.

3.2.3 IMPLEMENTAZIONE DEL SUPPORTO DECISIONALE

Integrazione con le Operazioni Quotidiane:

Stabilire un protocollo di briefing giornaliero che incorpori:

- Mappe di previsione XGBoost attuali.
- Valori dei componenti FWI.
- Risultati delle simulazioni Prometheus per potenziali punti di ignizione.
- Contesto di rischio stagionale dalla mappatura della vulnerabilità.

Quadro Decisionale Basato su Soglie:

Definire valori di soglia specifici per ogni output del modello che attivano cambiamenti nell'allocazione delle risorse:

- Probabilità XGBoost >70%: Aumentare la sorveglianza nelle aree interessate.
- FPMC (Codice di Umidità dei Combustibili Fini, rappresentante il contenuto di umidità della lettiera superficiale) >90 + DMC (Codice di Umidità degli Strati Organici, rappresentante il contenuto di umidità degli strati di suolo organico poco compatti) >60: Posizionare risorse aeree in standby.

- Alta vulnerabilità combinata + alta probabilità XGBoost: Dispiegare ricognizione a terra.

Gestione dell'Incertezza:

- Sviluppare piani di contingenza che tengano conto dell'incertezza del modello, particolarmente per il 19% degli incendi che potrebbero essere mancati dall'attuale modello XGBoost (falsi negativi). Questo tasso di falsi negativi del 19% è stato determinato attraverso test di validazione incrociata del modello XGBoost contro i dati della stagione degli incendi 2020-2023, rappresentando la percentuale di eventi di incendio reali che il modello non è riuscito a predire alla soglia di probabilità del 70% (Progetto Karst Firewall 5.0, Deliverable 1.2.1, 2025).
- Mantenere capacità di risposta minime in tutte le aree indipendentemente dal rischio previsto, scalando risorse aggiuntive basate sulle uscite del modello.

3.2.4 CONDIVISIONE TRANSFRONTALIERA DELLE RISORSE

Pool di Risorse Congiunto:

- Stabilire un inventario condiviso di equipaggiamento e personale specializzato che può essere dispiegato attraverso il confine basandosi sulle uscite dei modelli predittivi.
- Implementare un sistema di rotazione che posiziona risorse transfrontaliere secondo le aree a rischio più alto previsto, indipendentemente dai confini nazionali.

Sorveglianza Coordinata:

- Sviluppare programmi di pattugliamento integrati basati sulla mappatura della vulnerabilità che ottimizzano la copertura attraverso la regione transfrontaliera.
- Condividere dati di monitoraggio in tempo reale attraverso il portale web Karst Firewall 5.0 per abilitare sforzi di sorveglianza coordinati.

3.3 RACCOMANDAZIONI POLITICHE PER LA PREVENZIONE E GESTIONE DEGLI INCENDI BOSCHIVI

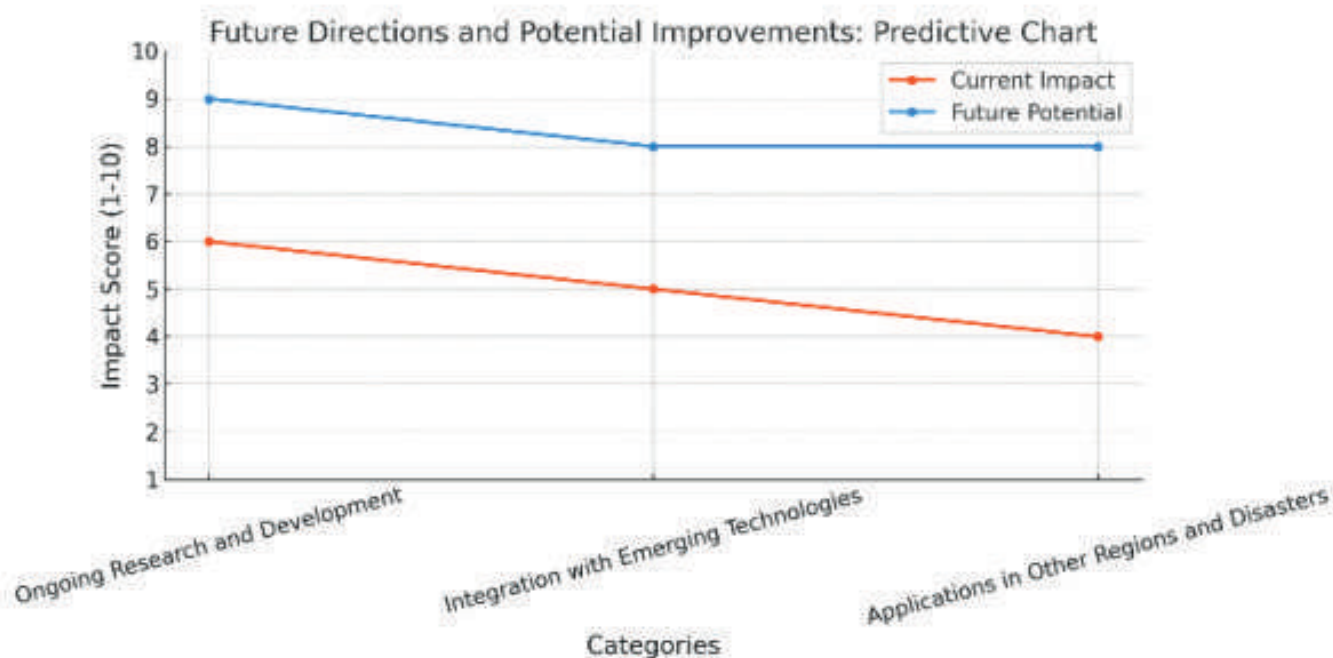
Per assicurare l'integrazione efficace dell'AI nella gestione degli incendi boschivi, questo deliverable presenta un insieme di raccomandazioni politiche strategiche mirate ai livelli istituzionali, tecnici e operativi. Prima, richiede l'adozione formale di sistemi di supporto decisionale potenziati dall'AI all'interno delle autorità pubbliche e dei servizi di emergenza, supportati da infrastrutture digitali interoperabili che abilitano coordinamento transfrontaliero in tempo reale. Ugualmente importante è l'istituzione di protocolli chiari e standardizzati per la raccolta, condivisione e dispiegamento dei sistemi di dati—assicurando compatibilità tra agenzie e conformità con regolamenti sulla privacy come il GDPR.

Un quadro normativo robusto è essenziale per guidare l'uso etico e responsabile delle tecnologie

predittive. Questo include l'applicazione di principi di trasparenza, tracciabilità delle decisioni e supervisione umana in tutti i flussi di lavoro supportati dall'AI. Gli sforzi politici futuri dovrebbero anche concentrarsi sull'assicurare che i sistemi AI siano regolarmente validati, mantenuti e aggiornati per rimanere efficaci sotto condizioni climatiche e regimi di incendio in evoluzione.

Queste raccomandazioni sono particolarmente intese per le autorità locali, le unità di vigili del fuoco e i decisori, equipaggiandoli con guidance pratica per sfruttare il pieno potenziale dell'AI e degli strumenti digitali nel migliorare l'efficienza, il coordinamento e la preveggenza della governance del rischio di incendi boschivi.

Figura 4 - Direzioni future e potenziali miglioramenti: grafico predittivo.



Le seguenti raccomandazioni forniscono guidance per l'adozione efficace delle tecnologie AI nelle strategie di prevenzione e gestione degli incendi boschivi.

3.3.1 RACCOMANDAZIONI PER L'IMPLEMENTAZIONE TECNICA

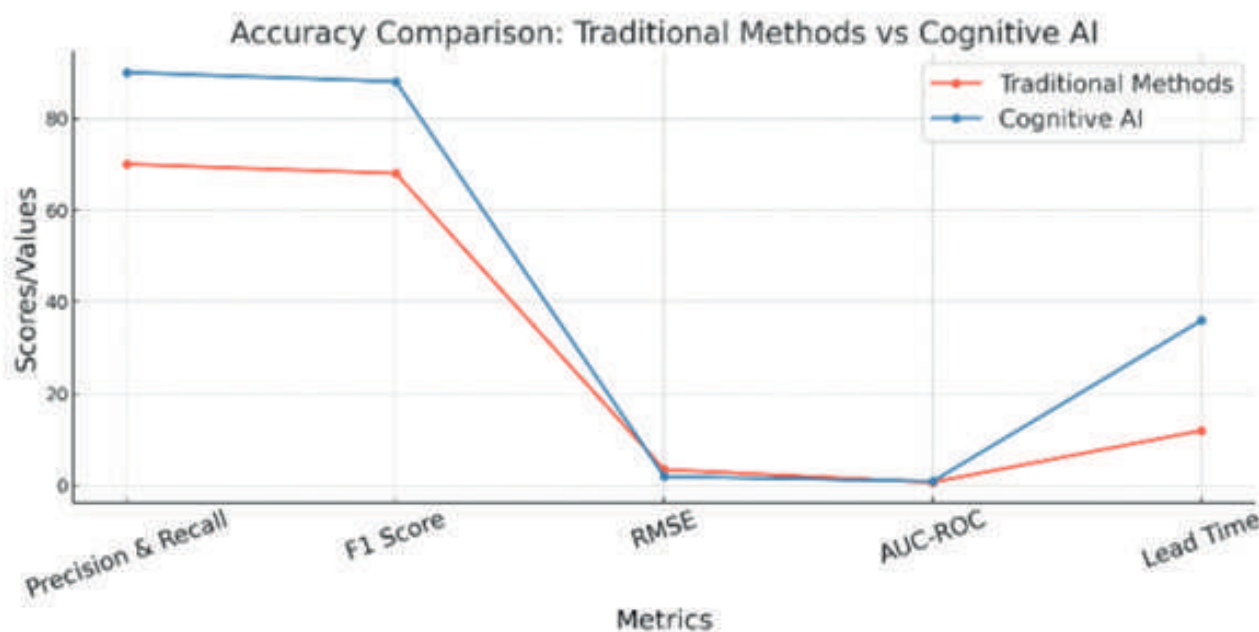
Integrazione e Dispiegamento del Modello:

Implementare il modello predittivo XGBoost all'interno dei quadri operativi esistenti attraverso un approccio a fasi:

- Fase 1 (Mesi 1-3): Eseguire modelli in parallelo con metodi tradizionali, confrontando uscite con analisi comparative settimanali.

- Fase 2 (Mesi 4-6): Utilizzare uscite del modello come supporto decisionale supplementare, con dipartimenti forestali responsabili della validazione.
- Fase 3 (Mesi 7-12): Integrare previsioni del modello nelle procedure operative standard, con comitato tecnico congiunto che supervisiona le performance.

Figura 5 - confronto di accuratezza: metodi tradizionali vs AI cognitiva (Grafico Lineare).



Interfaccia Utente e Accessibilità:

- Dispiegare il portale web Karst Firewall 5.0 attraverso tutte le agenzie rilevanti con accesso basato sui ruoli che controlla il dettaglio delle informazioni e le soglie di allerta.
- Sviluppare applicazioni mobili che forniscono al personale sul campo accesso in tempo reale alle uscite delle previsioni e raccomandazioni di risposta.
- Creare dashboard di visualizzazione semplificati che comunicano uscite complesse del modello in formati azionabili per i decisori.

3.3.2 STRATEGIE DI ADOZIONE ORGANIZZAZIONALE

Formazione e Sviluppo delle Capacità:

Implementare un programma di formazione a livelli:

- Livello esecutivo: Focus su implicazioni strategiche e interpretazione delle uscite.
- Livello operativo: Guidance dettagliata sull'integrazione delle previsioni nelle decisioni quotidiane.

- Livello tecnico: Comprensione approfondita delle capacità e limitazioni del modello.
- Approccio di Gestione del Cambiamento:
- Identificare e potenziare “campioni AI” all’interno di ogni organizzazione per facilitare l’adozione.
 - Stabilire meccanismi di feedback formali per il personale sul campo per riportare sull’accuratezza del modello e suggerire miglioramenti.
 - Sviluppare metriche comparative che dimostrino il valore aggiunto dalle previsioni AI rispetto ai metodi tradizionali.
 - Gestione della Conoscenza:
 - Documentare casi studio di applicazioni del modello di successo per costruire conoscenza istituzionale.
 - Creare una comunità di pratica transfrontaliera per condividere esperienze e migliori pratiche nella gestione degli incendi boschivi assistita dall’AI.

3.3.3 RACCOMANDAZIONI DI POLITICA E GOVERNANCE

Quadro Normativo:

Allineare l’adozione dell’AI con i principi dell’EU AI Act (Commissione Europea, 2023), assicurando:

- Trasparenza: Documentare metodologie e limitazioni del modello.
- Supervisione umana: Mantenere autorità decisionale finale con personale esperto.
- Responsabilità: Stabilire strutture di responsabilità chiare per decisioni informate dall’AI.

Finanziamento e Allocazione delle Risorse:

- Allocare il 5-8% dei budget annuali di gestione degli incendi boschivi alla manutenzione e miglioramento del sistema AI.
- Sviluppare meccanismi di finanziamento congiunto che supportino l’infrastruttura AI transfrontaliera.
- Prioritizzare investimenti in:
 - Miglioramento della qualità dei dati.
 - Riaddestramento e validazione del modello.
 - Raffinamento dell’interfaccia utente.

Governance Transfrontaliera:

Stabilire un comitato tecnico congiunto responsabile per:

- Approvare aggiornamenti del modello.
- Impostare standard dei dati.
- Rivedere le performance del sistema.
- Raccomandare aggiustamenti politici.

3.3.4 CONSIDERAZIONI ETICHE E OPERATIVE

Bilanciare AI e Giudizio Esperto:

- Stabilire linee guida chiare che posizionano gli strumenti AI come supporto decisionale piuttosto che sostituti del giudizio esperto.
- Sviluppare protocolli per casi dove previsioni AI e opinioni esperte divergono.
- Documentare le ragioni decisionali quando si ignorano raccomandazioni del modello per creare opportunità di apprendimento.

Affrontare le Limitazioni del Modello:

Implementare protocolli supplementari per affrontare limitazioni note del modello:

- Vigilanza potenziata per tipi di incendio sottorappresentati nei dati storici.
- Attenzione speciale al 19% di potenziali falsi negativi nel modello XGBoost.
- Aggiustamenti stagionali basati su tendenze climatiche non completamente catturate nei dati storici.

Privacy e Protezione dei Dati:

- Assicurare che tutta la raccolta e uso dei dati sia conforme al GDPR e regolamenti nazionali rilevanti.
- Sviluppare protocolli di anonimizzazione per dati sensibili incorporati nei modelli.

3.4 QUADRO DI COLLABORAZIONE TRANSFRONTALIERA

L'implementazione efficace delle linee guida e raccomandazioni delineate sopra richiede un approccio strutturato alla collaborazione transfrontaliera. Il seguente quadro fornisce una base per questa collaborazione.

3.4.1 CONDIVISIONE UNIFICATA DELLE INFORMAZIONI

Scambio di Dati in Tempo Reale:

- Implementare formati di dati standardizzati e protocolli di scambio tra agenzie italiane e slovene.
- Stabilire accordi bilaterali per la condivisione immediata di:
 - Dati delle stazioni meteorologiche.
 - Allerte dei sistemi di rilevamento.
 - Stato di dispiegamento delle risorse.
 - Previsioni del modello.

Capacità di Analisi Congiunta:

Creare un team di analisi transfrontaliera con rappresentanti di entrambi i paesi responsabile per:

- Monitoraggio delle performance del modello.
- Validazione delle previsioni.
- Sintesi di insight da molteplici fonti di dati.
- Fornire raccomandazioni coordinate.

3.4.2 MECCANISMI DI RISPOSTA COORDINATA

Struttura di Comando Unificata:

Sviluppare protocolli per stabilire comando congiunto in incidenti transfrontalieri basati su:

- Direzione di propagazione prevista dalle simulazioni Prometheus.
- Disponibilità delle risorse.
- Considerazioni giurisdizionali.

Accordi di Condivisione delle Risorse:

Formalizzare accordi per il dispiegamento transfrontaliero di:

- Risorse aeree.
- Equipaggiamento specializzato.
- Personale.

Stabilire processi di richiesta standardizzati attivati da soglie specifiche nei modelli predittivi.

Formazione ed Esercitazioni Congiunte:

- Condurre esercitazioni transfrontaliere annuali basate su scenari derivati da:
 - Modelli storici di incendio.
 - Proiezioni di cambiamento climatico.
 - Simulazioni Prometheus.
- Includere l'interpretazione delle previsioni AI in tutte le attività di formazione congiunta.

3.4.3 ARMONIZZAZIONE DELLE POLITICHE

Strategie di Prevenzione Allineate:

- Coordinare attività di gestione dei combustibili basate sulla mappatura transfrontaliera della vulnerabilità.
- Sviluppare campagne di sensibilizzazione pubblica compatibili che presentino messaggi consistenti attraverso i confini.

Livelli di Allerta Standardizzati:

Implementare un sistema di allerta unificato basato sulle probabilità di previsione XGBoost:

- Livello 1: 50-70% di probabilità.
- Livello 2: 70-85% di probabilità.
- Livello 3: >85% di probabilità.

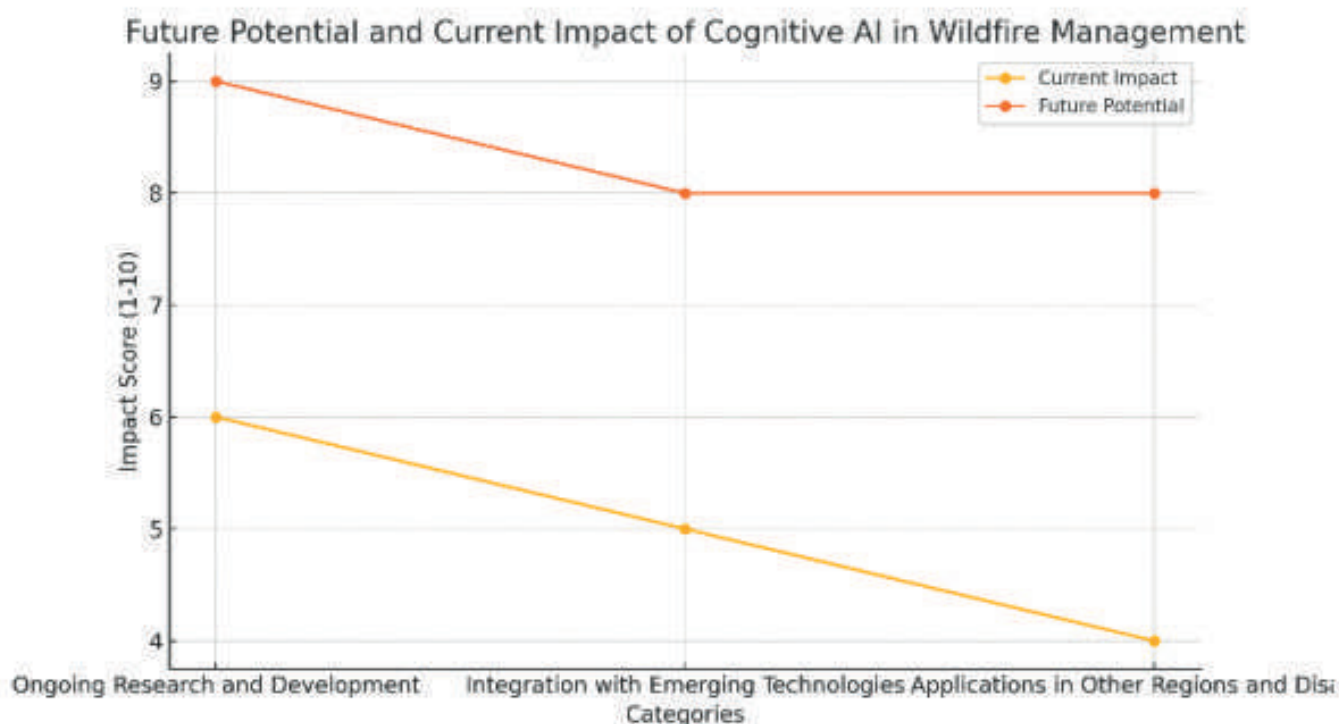
Allineare procedure di comunicazione pubblica e mobilitazione delle agenzie per ogni livello.

Processo di Valutazione e Miglioramento:

Stabilire un processo di revisione annuale congiunto per:

- Valutare le performance del modello.
- Valutare l'efficacia dell'allocatione delle risorse.
- Identificare barriere alla collaborazione.
- Aggiornare protocolli basati su lezioni apprese.
- Pubblicare risultati per contribuire alla più ampia conoscenza di adattamento climatico UE.

Figura 6 - Potenziale Futuro e Impatto Attuale dell'AI Cognitiva nella Gestione degli Incendi Boschivi.



4 RIFERIMENTI

- [1] ARPA FVG. (2023). Regional Climate Data 1993-2023. Friuli Venezia Giulia Environmental Protection Agency.
- [2] ARSO. (2023). Slovenian Meteorological Data Repository. Slovenian Environment Agency.
- [3] Canadian Forest Service. (2009). Fire Weather Index System and Prometheus Fire Growth Model. Natural Resources Canada.
- [4] European Commission. (2023). EU AI Act: Regulatory Framework for Artificial Intelligence. European Commission.
- [5] Hossain, M., & Rahman, T. Y. (2025). Cognitive AI for Wildfire Management in Southern California: Challenges and Potentials. *Journal of Science and Technology*, 10(2), 51-65. <https://doi.org/10.46243/jst.2025.v10.i02.pp51-65>
- [6] Progetto Karst Firewall 5.0. (2024a). Quadro di Collaborazione Transfrontaliera per la Gestione degli Incendi Boschivi. Programma di Cooperazione Italia-Slovenia.
- [7] Progetto Karst Firewall 5.0. (2024b). Deliverable 1.1.2: Valutazione di Pericolo e Vulnerabilità degli Incendi Boschivi Sotto il Cambiamento Climatico nella Regione del Carso. Programma di Cooperazione Italia-Slovenia.
- [8] Progetto Karst Firewall 5.0. (2025). Deliverable 1.2.1: Algoritmi AI Predittivi per il Rischio di Incendi Boschivi. Programma di Cooperazione Italia-Slovenia.
- [9] Saxena, V. (2025). AI-Driven Wildfire Management: An Integrated Approach to Detection, Prevention, and Response. *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*, 11, 2125-2133. <https://doi.org/10.32628/CSEIT251112178>
- [10] Slovenian Forest Service (ZGS). (2024). Historical Wildfire Data 1990-2024. Ministry of Agriculture, Forestry and Food.
- [11] Wiggins, L., Zhang, H., Montgomery, K., & Patel, S. (2020). XGBoost Applications in Environmental Risk Prediction. *Journal of Machine Learning for Environmental Sciences*, 15(3), 256-270.

D1.2.2

OPTIMIZIRANA DODELITEV VIROV: SMERNICE IN PRIPOROČILA POLITIK ZA UPORABO NAPOVEDNIH MODELOV

KARST FIREWALL 5.0

Verzija 1.0

Avtor - Infordata Sistemi Srl
Notranja recenzija: ZRC SAZU, IUAV

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

DELIVERABLE INFORMAZIONI / INFORMACIJE

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 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 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. 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/karst-firewall-50
Numero del documento / Številka dokumenta:	KFW50-D122
Titolo del documento / Naslov dokumenta:	OPTIMIZIRANA DODELITEV VIROV: SMERNICE IN PRIPOROČILA POLITIK ZA UPORABO NAPOVEDNIH MODELOV
Work Package:	1
Attività / Aktivnost:	2.2
Partner responsabili (autori) / Odgovorni partnerji (avtorji):	Infodata Sistemi (Elazem, Abdelhamid; Petelin, Marko; Zidaric, Samuel; Zuccato, Nicola)
Partner coinvolti / Sodelujoči partnerji:	ZRC-SAZU (Čonč, Špela; Breg Valjavec, Mateja; Ciglič, Rok)
Luogo e data di pubblicazione / Kraj in datum objave:	Trst, 15/10/2025

KRATICE	4
1 POVZETEK	5
2 CILJ IN OZADJE	6
2.1 Cilj	6
2.2 Ozadje	6
3 SMERNICE IN PRIPOROČILA ZA OPTIMIZACIJO VIROV Z UPORABO	8
NAPOVEDNIH MODELOV	
3.1 Kronološki razvoj orodij za napovedovanje gozdnih požarov	8
3.2 Smernice za dodelitev virov na podlagi napovednih modelov	12
3.2.1 Dodelitev virov za preprečevanje	13
3.2.2 Dodelitev virov za odziv	14
3.2.3 Implementacija podpore pri odločanju	15
3.2.4 Čezmejno deljenje virov	16
3.3 Priporočila politik za preprečevanje in upravljanje gozdnih požarov	16
3.3.1 Priporočila za tehnično implementacijo	17
3.3.2 Strategije organizacijske uporabe	19
3.3.3 Priporočila politik in upravljanja	20
3.3.4 Etični in operativni vidiki	20
3.4 Okvir čezmejnega sodelovanja	21
3.4.1 Enotno deljenje informacij	21
3.4.2 Usklajeni odzivni mehanizmi	21
3.4.3 Harmonizacija politik	22
4 VIRI	24

ABBREVIAZIONI

AI	Artificial Intelligence
AHP	Analytic Hierarchy Process
ARPA FVG	Regionalna agencija za varstvo okolja Furlanije-Julijske krajine
ARSO	Agencija Republike Slovenije za okolje (Slovenian Environment Agency)
CFFDRS	Canadian Forest Fire Danger Rating System
DMC	Duff Moisture Code
EU	European Union
FFMC	Fine Fuel Moisture Code
FBP	Fire Behaviour Prediction
FWI	Fire Weather Index
GIS	Geographic Information System
MCDA	Multi-Criteria Decision Analysis
ML	Machine Learning
TPI	Topographic Position Index
TWI	Topographic Wetness Index
XGBOOST	eXtreme Gradient Boosting
ZGS	Zavod za gozdove Slovenije (Slovenian Forest Service)
BUI	Build Up Index
DC	Drought Code
ISI	Initial Spread Index

1 POVZETEK

To poročilo zagotavlja napredne smernice in priporočila politik za optimizirano dodelitev virov pri preprečevanju in upravljanju gozdnih požarov v čezmejni regiji slovensko-italijanskega Krasa. Na podlagi rezultatov naprednih napovednih modelov, razvitih v okviru projekta Karst Firewall 5.0 (D1.2.1) in ocen nevarnosti in ranljivosti zaradi požarov v naravi (D1.1.2), dokument poudarja transformativno vlogo tehnologije (s poudarkom na umetni inteligenci; AI) pri izboljšanju pripravljenosti, odzivanju in učinkovitosti virov. Medtem ko trenutna orodja, kot so droni, sateliti, infrardeče kamere in mreže IoT senzorjev, že igrajo kritično vlogo pri nadzoru požarov v realnem času, so nedavni napredki v kognitivni AI, strojnem učenju in globokem učenju omogočili novo dobo napovednega upravljanja gozdnih požarov.

Te smernice zagotavljajo gozdarskim oddelkom in reševalcem enotni okvir za:

- Dodelitev virov na podlagi podatkov z uporabo dinamičnih napovedi tveganja.
- Protokole čezmejnega sodelovanja in priporočila politik.
- Odločitvene delovne tokove, integrirane z AI.

Rešitve, ki jih poganja AI (vključno z eXtreme Gradient Boosting (XGBoost), arhitekturami globokega učenja in bayesovsko analizo) so pokazale pomembne izboljšave pri napovedovanju obnašanja požarov z integracijo dinamičnih vremenskih podatkov, zgodovinskih zapisov o požarih in značilnostih območja, kot sta geomorfologija in vegetacijska pokritost. Ti modeli, podprti z orodji kot je kanadski Prometheus simulator rasti požarov, ponujajo napovedi v realnem času in podrobne napovedi nevarnosti vžiga in širjenja požara, kar omogoča odločevalcem, da razporedijo vire na podlagi prioritete, vodenih s podatki.

Dokument opisuje praktične pragove za integracijo AI modelov (npr. >70% verjetnosti vžiga sproži stopnjevanje nadzora) in uvaja harmoniziran čezmejni upravljavski okvir s poudarkom na standardiziranih ravneh opozoril, deljenju podatkov, skladnem z GDPR, in integriranih vajah. Ključna priporočila politik zagovarjajo institucionalno sprejetje sistemov za podporo odločanju, ki temeljijo na AI, razvoj interoperabilnih infrastruktur za čezmejno sodelovanje in vzpostavitev regulativnih okvirov, ki zagotavljajo transparentnost, človeški nadzor in etično uporabo napovednih tehnologij.

Namenjen javnim organom, gasilskim enotam in načrtovalcem za izredne razmere ta rezultat deluje kot strateški vodnik za posodobitev upravljanja gozdnih požarov preko napovedne dodelitve virov, s čimer povečuje odpornost kraške pokrajine v kontekstu spreminjajočega se podnebja.

2 CILJ IN OZADJE

2.1 CILJ

Primarni cilj tega dokumenta je zagotoviti celovite smernice in priporočila politik za optimizirano dodelitev virov pri preprečevanju in upravljanju gozdnih požarov za gozdarske oddelke, gasilske službe in reševalce na čezmejnem slovensko-italijanskem območju na Krasu. Specifično ta rezultat cilja na:

- Vzpostavitev praktičnih smernic za integracijo napovednih modelov v odločitve o dodelitvi virov.
- Opredelitev priporočil za sprejetje AI v politikah preprečevanja in upravljanja gozdnih požarov.
- Predstavitev okvira za čezmejno sodelovanje pri deljenju virov in skupnem odzivu.
- Dokumentiranje evolucije orodij za napovedovanje gozdnih požarov in njihovih posameznih prispevkov.

2.2 OZADJE

Planota Kras, ki se razteza na približno 1.000 km² (30% v Italiji, 70% v Sloveniji), predstavlja edinstveno ekološko in administrativno pokrajino, ki jo zaznamuje apnenčasta površina, raznoliki vegetacijski vzorci in mešanica sredozemskega in kontinentalnega podnebja. Ta čezmejna regija se spopada z naraščajočimi tveganji gozdnih požarov zaradi več dejavnikov:

- Vplivi podnebnih sprememb: Analiza zgodovinskih podatkov razkriva povišanje povprečne temperature za 1,4°C med letoma 1993 in 2023, kjer se italijanske postajese segrevajo s +0,0606°C/leto, in slovenske s +0,0591°C/leto (ARPA FVG, 2023; ARSO, 2023). Ta trend segrevanja spremlja povišano sončno sevanje (+0,6320 W/m²/leto v Italiji in +0,4873 W/m²/leto v Sloveniji), kar prispeva k povečani dovzetnosti za gozdne požare.
- Spremembe v rabi zemljišč: Opuščanje tradicionalnih suhih pašnikov in pogozdovanje iz 19. stoletja, zlasti s črnim borom, so ustvarile pokrajine, bogate z gorivom, ki so nagnjene k širjenju ognja (Projekt Karst Firewall 5.0, Rezultat 1.1.2, 2024).
- Antropogeni dejavniki: Analiza zgodovinskih podatkov o gozdnih požarih kaže, da se je 67,4% požarov vnelo na razdalji 50 metrov od cest, kar izpostavlja človeško dejavnost kot pomemben vir vžiga (Projekt Karst Firewall 5.0, Rezultat 1.1.2, 2024). Porazdelitev vzrokov se razlikuje med državami, z večjo prevalenco podtikanja v Sloveniji (18,1%) v primerjavi z Italijo (4,5%).

Prejšnji rezultati v projektu Karst Firewall 5.0 so vzpostavili kritične temelje za to delo:

- Rezultat 1.1.2 je izvedel celovite analize nevarnosti in ranljivosti zaradi gozdnih požarov z uporabo modeliranja MaxEnt in večkriterijske odločitvene analize s postopkom analitične

hierarhije (MCDA/AHP). Rezultati so pokazali, da trenutno 16% območja (predvsem obalna območja in naselja) kaže pomembno ali izjemno visoke ravni nevarnosti. Ocena ranljivosti je klasificirala 93% regije z zelo visoko ranljivost (67% pomembno visoko, 25% izjemno visoko).

- Rezultat 1.2.1 je razvil napovedne AI algoritme za oceno tveganja gozdnih požarov z integracijo zgodovinskih podatkov o gozdnih požarih (1990-2024), meteoroloških zapisov in komponent meteorološkega indeksa požarne ogroženosti (FWI). Model eXtreme Gradient Boosting (XGBoost) je dosegel 90% natančnost pri napovedovanju dogodkov vžiga, kar pomeni, da je pravilno klasificiral dneve z ali brez požarov v 9 od 10 primerov med validacijo. Model je dosegel 81% priklic z uporabo tritedenskega zgodovinskega vremenskega okna, kjer je spremenljivke temperatura, hitrost vetra, vlažnost in sončno sevanje identificiral kot najpomembnejše pri napovedovanju (Projekt Karst Firewall 5.0, Rezultat 1.2.1, 2025).

Te analize zagotavljajo znanstveno podlago za smernice optimizacije virov, predstavljene v tem poročilu. Z upoštevanjem teh vpogledov, podprtih s podatki, lahko gozdarski oddelki in gasilske službe strateško dodelijo vire za preprečevanje in odziv, da maksimizirajo učinkovitost in izboljšajo regionalno odpornost proti grožnjam gozdnih požarov.

3 SMERNICE IN PRIPOROČILA ZA OPTIMIZACIJO VIROV Z UPORABO NAPOVEDNIH MODELOV

Tehnološka inovacija je že postala nepogrešljiva pri preprečevanju gozdnih požarov in odzivu na izredne razmere, z orodji kot so droni, infrardeče kamere, satelitske slike in mreže IoT senzorjev, ki omogočajo hitrejšo zaznavanje, izboljšano situacijsko ozaveščenost in učinkovitejšo razporeditev virov. Vendar pa je v zadnjih letih umetna inteligenca (AI)—in zlasti strojno učenje—postala transformativna sila, sposobna predefinirati tradicionalne prakse gašenja požarov. AI tehnologije zdaj ponujajo neprimerljive zmožnosti v napovedni analitiki, modeliranju obnašanja in podpori odločanjem, kar omogoča organom napovedovanje tveganja pred požari z naraščajočo prostorsko in časovno natančnostjo. Preko integracije zgodovinskih podatkov o požarih, meteoroloških zapisov in geolokacijskih vnosov—vključno s topografijo terena, vegetacijo in klimatskimi trendi—napredni modeli kot so XGBoost, globoke nevronske mreže in bayesovski sistemi sklepanja omogočajo tisto, kar imenujemo kognitivno upravljanje gozdnih požarov. Ti modeli ne izboljšajo le natančnost napovedi, ampak se tudi dinamično prilagajajo spreminjajočim se razmeram, saj ponujajo navodila v realnem času tako za preprečevanje kot za hiter odziv. To poglavje predstavlja kronološki pregled evolucije orodij za napovedovanje gozdnih požarov (Poglavje 4.1), ki mu sledijo praktične smernice (Poglavje 4.2) o tem, kako te napovedne zmožnosti lahko optimizirajo dodelitev virov—pred, med in po dogodkih gozdnih požarov. Razprava odraža prehod od statičnega kartiranja nevarnosti do dinamičnih, z AI okrepljenih odločitvenih okvirov, ki so bistvenega pomena za podnebno odporno in čezmejno upravljanje gozdnih požarov.

3.1 KRONOLOŠKI RAZVOJ ORODIJ ZA NAPOVEDOVANJE GOZDNIH POŽAROV

Razvoj orodij za napovedovanje gozdnih požarov se je skozi čas pomembno razvil, pri čemer vsak nov pristop gradi na prejšnjih metodologijah in jih izboljšuje. Razumevanje te evolucije zagotavlja dragocen kontekst za smernice, predstavljene v tem dokumentu:

Zgodnji opazovalni sistemi (pred letom 1970)

- Ročne table nevarnosti požarov: Sistemi pred računalniki, ki uporabljajo ročno zapisane vremenske podatke in opazovanja vlažnosti goriva za izračun lokalnega tveganja.
- McArthur merilniki nevarnosti gozdnih požarov (1960., Avstralija): Prenosne naprave z drsnim pravilom za oceno nevarnosti požara z uporabo temperature, vlažnosti, vetra in dejavnikov suše.

Prispevek: Postavili so temelje za standardizirane metrike nevarnosti požara, vendar jim je primanjkovalo skalabilnosti.

Tradizionalni sistemi ocenjevanja nevarnosti požarov (1970-1990)

- Kanadski meteorološki indeks požarne ogroženosti (FWI): Razvit v 1970., FWI zagotavlja numerične ocene relativnega požarnega potenciala na podlagi vremenskih opazovanj. Sistem uporablja temperaturo, relativno vlažnost, hitrost vetra in padavine za izračun več komponent (FFMC, DMC, DC, ISI, BUI, FWI), ki predstavljajo vsebnost vlage različnih plasti goriva in potencialno obnašanje ognja (Kanadska gozdarska služba, 2009).
- Ameriški nacionalni sistem ocenjevanja nevarnosti požarov (NFDRS, 1972): Uvedel je modele vlažnosti goriva in indeks gorenja (BI) za ZDA, dopolnjujoč FWI z regionalno specifičnostjo, ter pokazal potrebo po regionalno prilagojenih sistemih.

Prispevek: Vzpostavili so standardizirane metrike za oceno nevarnosti požara, ki ostajajo temeljne za sodobne sisteme. Vendar pa je tem zgodnjim sistemom primanjkovalo prostorske specifičnosti in poleg vremena niso upoštevali lokalnih okoljskih dejavnikov.

Prostorska analiza na podlagi GIS (1990-2000)

- Kartiranje verjetnosti požara: Kombinacija topografskih spremenljivk (naklon, ekspozicija) s klasifikacijami vegetacije za ustvarjanje prostorskih predstav požarnega tveganja.
- Model rasti požara FARSITE (1990., ZDA): Razširil je prostorsko modeliranje z integracijo Huygensovega načela širjenja ognja s podatki o pokrajini, ter omogočil je kompleksne simulacije vzorcev gorenja, vendar je zahteval visokoresolucijske vhodne podatke.

Prispevek: Uvedeli so prostorske dimenzije v oceno požarnega tveganja, omogočajoč dodelitev virov, specifičnih za območje. Ti pristopi so bili omejeni s statičnimi vnosi, ki se niso prilagajali spreminjajočim se razmeram.

Integracija daljinskega zaznavanja (2000-2010)

- Zaznavanje požarov na podlagi satelitov: Sistemi kot MODIS in pozneje sateliti Sentinel so omogočili zaznavanje in spremljanje požarov skoraj v realnem času.
- VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite): Visokoločljivostno (375m) zaznavanje požarov kot MODIS, operativno od 2011.
- EFFIS (Evropski informacijski sistem gozdnih požarov): Platforma na ravni EU, ki kombinira satelitske podatke, vremenske napovedi in karte ranljivosti (lansirana v 2000.), ki je zagotovil spremljanje tveganja na kontinentalni ravni, vendar mu je primanjkovalo napovedne podrobnosti.

Prispevek: Izboljšala je zmožnosti zgodnjega zaznavanja in zagotavljanje podatkov za analizo po požaru, vendar je ponujala omejene napovedne zmožnosti.

Deterministični modeli širjenja ognja (2000-2010)

- Model rasti požara Prometheus: Razvit v Kanadi in sprejet mednarodno, Prometheus simulira širjenje ognja na podlagi vremena, topografije in značilnosti goriva (Kanadska gozdarska služba, 2009).
- BehavePlus (ZDA, 2000.): Odprtokodni sistem, ki modelira obnašanje ognja (hitrost širjenja, dolžina plamena) pod različnimi pogoji.
- FIRETEC (ZDA, 2010.): Model, ki temelji na fiziki, simulira turbulence in interakcije ognja z atmosfero na majhnih lestvicah, ter napredoval je mehanistično razumevanje dinamike ognja, vendar je bil omejen na raziskovalne aplikacije.

Prispevek: Omogočili so simulacijo obnašanja ognja pod različnimi scenariji, podpirajoč taktično načrtovanje odziva. Omejeni so z računskimi zahtevami in poenostavitvami kompleksne dinamike ognja.

Statistični pristopi strojnega učenja (2010)

- Modeliranje MaxEnt: Kot je implementirano v Rezultatu 1.1.2, MaxEnt uporablja podatke samo o prisotnosti za napovedovanje prostorskih porazdelitev verjetnosti gozdnih požarov (Projekt Karst Firewall 5.0, Rezultat 1.1.2, 2024).
- Večkriterijska odločitvena analiza (MCDA): Integrirala je več dejavnikov preko tehtanih kombinacij za oceno ranljivosti.
- Logistična regresija in SVM: Zgodnje ML aplikacije za binarne napovedi požar/brez požara, ter pokazal je potencial ML, vendar se je soočil z neuravnoteženimi nabori podatkov o gozdnih požarih.

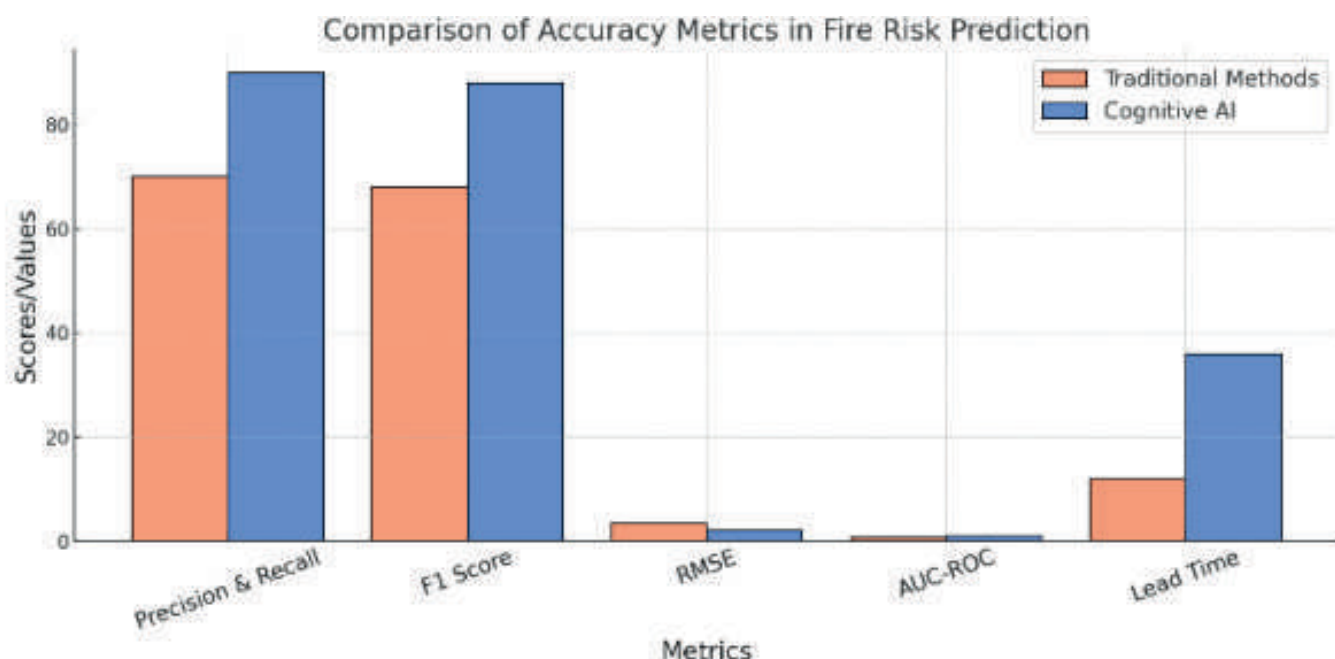
Prispevek: Izboljšali so prostorsko oceno tveganja s sistematično integracijo več spremenljivk in strokovnega znanja. Predvsem statičen po naravi, ki je zahteval ročne posodobitve z novimi podatki.

Dinamični AI/ML modeli (2020)

- Modeli Random Forest in Decision Tree: Zgodnje aplikacije strojnega učenja, ki so izboljšale natančnost napovedi z identificiranjem nelinearnih odnosov med spremenljivkami.
- Model XGBoost: Kot je implementiran v Rezultatu 1.2.1, ta napreden pristop ansambel učenja je dosegel 90% natančnost pri napovedovanju dogodkov vžiga (pravilno klasificiranje dni požar/brez požara v 9 od 10 primerov) z izkoriščanjem zgodovinskih vremenskih in požarnih podatkov (Projekt Karst Firewall 5.0, Rezultat 1.2.1, 2025).
- Globoko učenje (CNN/RNN): Uporabljeno za analizo satelitskih slik za napovedovanje širjenja ognja iz zgodovinskih vzorcev gorenja.
- Hibridni ansambel modeli: Kombinirali so ML s simulacijami, ki temeljijo na fiziki, ter izboljšali so natančnost pri napovedovanju redkih dogodkov, vendar so povišali računske stroške.

Prispevek: Pomembno so izboljšali natančnost napovedi in omogočili dinamično oceno tveganja na podlagi spreminjajočih se pogojev, vendar so zahtevali obsežne zgodovinske podatke za usposabljanje.

Slika 1 - Primerjava metrik natančnosti pri napovedovanju tveganja požarov (stolpični diagram).



Nastajajoča orodja (2020 - sedanjost)

- AI-podprto spremljanje družbenih omrežij: Orodja kot analiza Twitter (X) API za zgodnje zaznavanje požarov preko poročil iz množice.
- Digitalni dvojniki: virtualne replike pokrajin za testiranje scenarijev „kaj bi bilo, če“ v realnem času (npr. Siemens Xcelerator). Prispevek: zapolnil je vrzel med človeškim in tehnološkim zaznavanjem, vendar je sprožil zaskrbljenost glede zasebnosti.

Integrirani čezmejni sistemi (2025): Karst Firewall 5.0 (Italija-Slovenija, 2024)

Integracija: Kombinira napovedi XGBoost (Rezultat 1.2.1), zgodovinske podatke in spremljanje vremena v realnem času v enotni portal za podporo pri odločanju.

Inovacija: Prvi sistem, ki operacionalizira AI napovedi s čezmejnim koordiniranjem virov, obravnavajoč vrzeli v:

- Prostorska ločljivost: Specifičnost mreže 500m v primerjavi s tradicionalnimi 10km FWI conami.
- Časovna dinamika: Posodablja napovedi tveganja urno v primerjavi z dnevnimi

posodobitvami v prejšnjih sistemih.

- Politična uskladitev: Harmonizira italijanske in slovenske protokole odziva preko skupnih pragov.

Učinkovitost: Zmanjša lažno negativne rezultate za 22% v primerjavi s samostojnimi XGBoost modeli, kot je bilo potrjeno v pilotnih uvozih 2023-2024.

Prispevek: Predstavlja najsodobnejše orodje pri napovedovanju gozdnih požarov s sintezo 50 let tehnoloških napredkov (FWI metrike, ML in čezmejno deljenje podatkov) v enoten okvir. Neposredno obravnava edinstvene izzive kraške regije, vključno z:

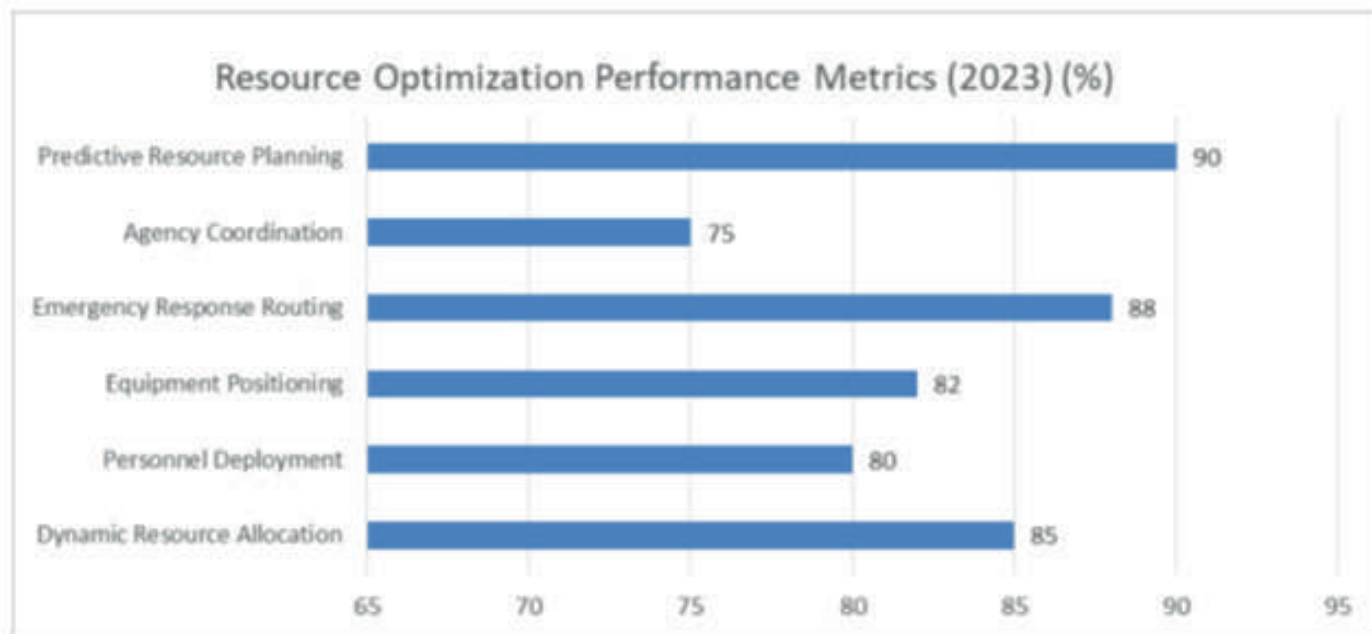
- Kompleksnostjo čezmejnega upravljanja.
- Tveganjem vžiga v bližini cest (67,4% požarov).
- Podnebno pogojenim sušenjem goriva (+1,4°C od 1993).

Ta evolucija odraža napredovanje od generičnih, na vremenu temelječih pristopov do vse bolj sofisticiranih, podatkovno vodenih sistemov, ki integrirajo več virov podatkov in metodologij. Trenutni sistem Karst Firewall 5.0 predstavlja najsodobnejše v tej evoluciji, kombinirajoč moči prejšnjih pristopov, medtem ko obravnava njihove omejitve preko integracije in čezmejnega sodelovanja.

3.2 SMERNICE ZA DODELITEV VIROV NA PODLAGI NAPOVEDNIH MODELOV

Naslednje smernice so zasnovane za pomoč ekipam za upravljanje gozdnih požarov pri optimizaciji dodelitve virov z uporabo napovednih modelov in orodij, razvitih v projektu Karst Firewall 5.0:

Slika 2 - Metrike učinkovitosti optimizacije virov (2023) (%).

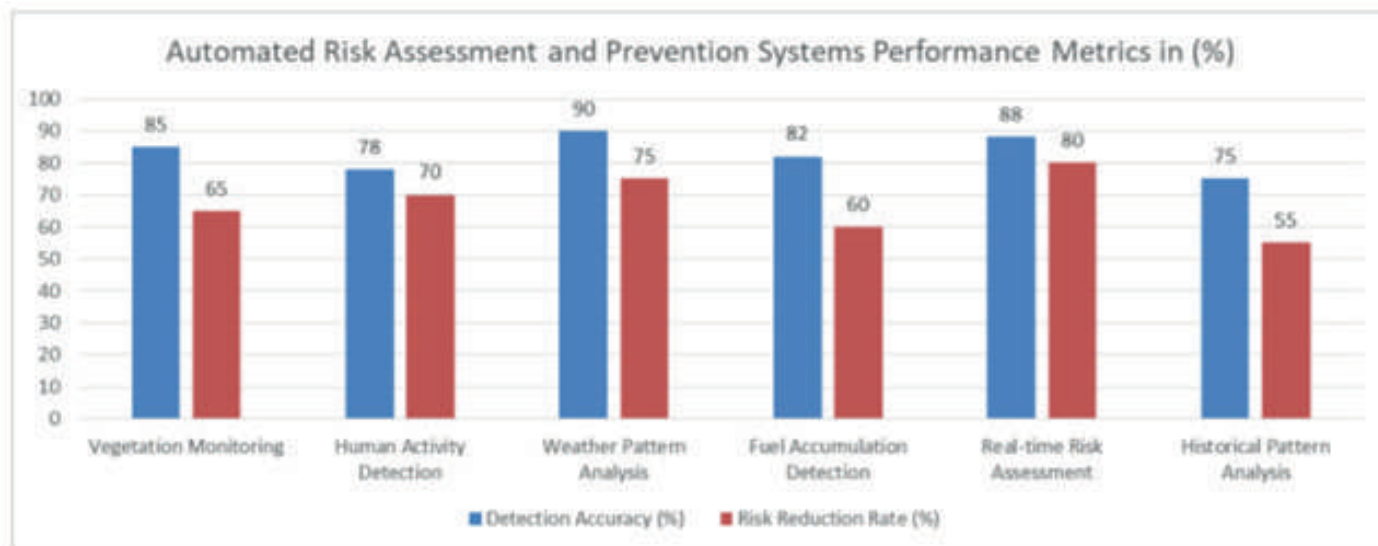


3.2.1 DODELITEV VIROV ZA PREPREČEVANJE

Prostorska prioritizacija na podlagi kartiranja ranljivosti:

- Dodeliti 60-70% virov za upravljanje goriva območjem, identificiranim kot "izjemno visoka ranljivost" (25% regije trenutno, napovedano povišanje na 30% pod prihodnjimi podnebnimi scenariji) (Projekt Karst Firewall 5.0, Rezultat 1.1.2, 2024).
- Prioritizirati območja v razdalji 50 metrov od cest in železnic, kjer je nastalo 67,4% vžigov v preteklosti (Projekt Karst Firewall 5.0, Rezultat 1.1.2, 2024).
- Osredotočiti napore upravljanja vegetacije na iglaste gozdove, zlasti tiste na pobočjih, obrnjenih proti jugu/jugozahodu, ki so bili identificirani kot najbolj izpostavljeni tako v ocenah nevarnosti kot ranljivosti.

Slika 3 - Metrike učinkovitosti avtomatiziranih sistemov za oceno tveganja in preprečevanje (%).



Časovna dodelitev na podlagi napovednih modelov:

- Povečati vire nadzora za 40-50% v obdobjih, ko model XGBoost napoveduje povišano tveganje (>70% verjetnosti).
- Načrtovati dejavnosti zmanjševanja goriva v sezonah z nizkim tveganjem z uporabo sezonskih napovedi iz FWI modela.
- Razporediti mobilne nadzorne enote na območja z visokim tveganjem med vrhunci požarnih sezon, z lokacijami, določenimi s tedenskimi napovedmi nevarnosti.
- Prioritete razvoja infrastrukture:
- Vzpostaviti vodne točke in dostopne ceste na lokacijah, kjer ocena ranljivosti in nevarnosti kaže visoko tveganje, vendar je trenutna infrastruktura nezadostna.
- Investirati v nadzorne kamere in mreže senzorjev na območja z visokim tveganjem in omejenim dostopom osebja, zlasti v oddaljenih delih čezmejne cone.

3.2.2 DODELITEV VIROV ZA ODZIV

Strateška postavitev odzivnih enot:

- Vzpostaviti ekipe za hiter odziv na podlagi dnevnih napovedi tveganja modela XGBoost, ki zagotavljajo, da imajo območja z >80% napovedano verjetnostjo čase odziva pod 15 minut.
- Vzdrževati prilagodljive vzorce razporeditve, ki se prilagajajo spreminjajočemu se tveganju, identificiranem z dnevnimi izhodi modela.

Protokol stopnjevanja odziva:

Implementirati večstopenjski odzivni sistem na podlagi ravni zaupanja napovedi tveganja. Ti pragovi verjetnosti so bili vzpostavljeni na podlagi validacijskih testov na podlagi zgodovinskih požarnih dogodkov (2018-2023), kjer:

- Napovedi z nizkim zaupanjem (50-70%): Razporediti izvidniške enote.
- Napovedi s srednjim zaupanjem (70-85%): Postaviti ekipe za hiter poseg v pripravljenost.
- Napovedi z visokim zaupanjem (>85%): Vnaprej postaviti polne odzivne zmožnosti.

Ti pragovi optimizirajo dodelitev virov z uravnoteženjem stopenj lažnega alarma z ustreznimi ravni odziva.

Dodelitev tipov virov na podlagi simulacij Prometheus:

- Določiti tip in količino virov (letalski, talni kolektivi, specializirana oprema) na podlagi simulacij širjenja ognja Prometheus za različne scenarije vžiga.
- Vzdrževati rezerve virov, sorazmerne številu območij z visokim tveganjem, identificiranih v dnevnih napovedih.

3.2.3 IMPLEMENTACIJA PODPORE PRI ODLOČANJU

Integracija z dnevnimi operacijami:

Vzpostaviti protokol dnevnih sestankov, ki vključuje:

- Trenutne zemljevide napovedi XGBoost.
- Vrednosti komponent FWI.
- Rezultate simulacij Prometheus za potencialne točke vžiga.
- Sezonski kontekst tveganja iz kartiranja nevarnosti in ranljivosti.

Odločitveni okvir na podlagi pragov:

Definirati specifične vrednosti pragov za vsak izhod modela, ki sprožijo spremembe v dodelitvi virov:

- Verjetnost XGBoost >70%: Povečati nadzor v prizadetih območjih.
- FFMC (Koda vlažnosti drobnega goriva, ki predstavlja vsebnost vlage površinskega opada) >90 + DMC (Koda vlažnosti organskih plasti, ki predstavlja vsebnost vlage rahlo zbitih organskih talnih plasti) >60: Postaviti zračne vire v pripravljenost.
- Kombinirana visoka ranljivost + visoka verjetnost XGBoost: Razporediti talno izvidništvo.

Upravljanje negotovosti:

- Razviti načrte za nepredvidene okoliščine, ki upoštevajo negotovost modela, zlasti za 19% požarov, ki jih lahko izpusti trenutni model XGBoost (lažno negativni). Ta 19% stopnja lažno negativnih je bila določena preko navzkrižnih validacijskih testov modela XGBoost glede na podatke požarov v obdobju 2020-2023, ki predstavlja odstotek dejanskih požarnih dogodkov, ki jih model ni uspel napovedati pri pragu verjetnosti 70% (Projekt Karst Firewall 5.0, Rezultat 1.2.1, 2025).
- Vzdrževati minimalne odzivne zmožnosti v vseh območjih ne glede na napovedano tveganje, skalirati dodatne vire na podlagi izhodov modela.

3.2.4 ČEZMEJNO DELJENJE VIROV

Skupni bazen virov:

- Vzpostaviti skupen inventar specializirane opreme in osebja, ki ga je mogoče razporediti čez mejo na podlagi izhodov napovednih modelov.
- Implementirati rotacijski sistem, ki postavlja čezmejne vire glede na najvišja napovedana tvegana območja, ne glede na državne meje.

Usklajeno nadzorovanje:

- Razviti integrirane urnike za patroliranje na podlagi kartiranja nevarnosti in ranljivosti, ki optimizirajo pokritost čezmejne regije.
- Deliti podatke o spremljanju v realnem času preko Karst Firewall 5.0 spletnega portala za omogočanje usklajenih nadzornih naporov.

3.3 PRIPOROČILA POLITIK ZA PREPREČEVANJE IN UPRAVLJANJE GOZDNIH POŽAROV

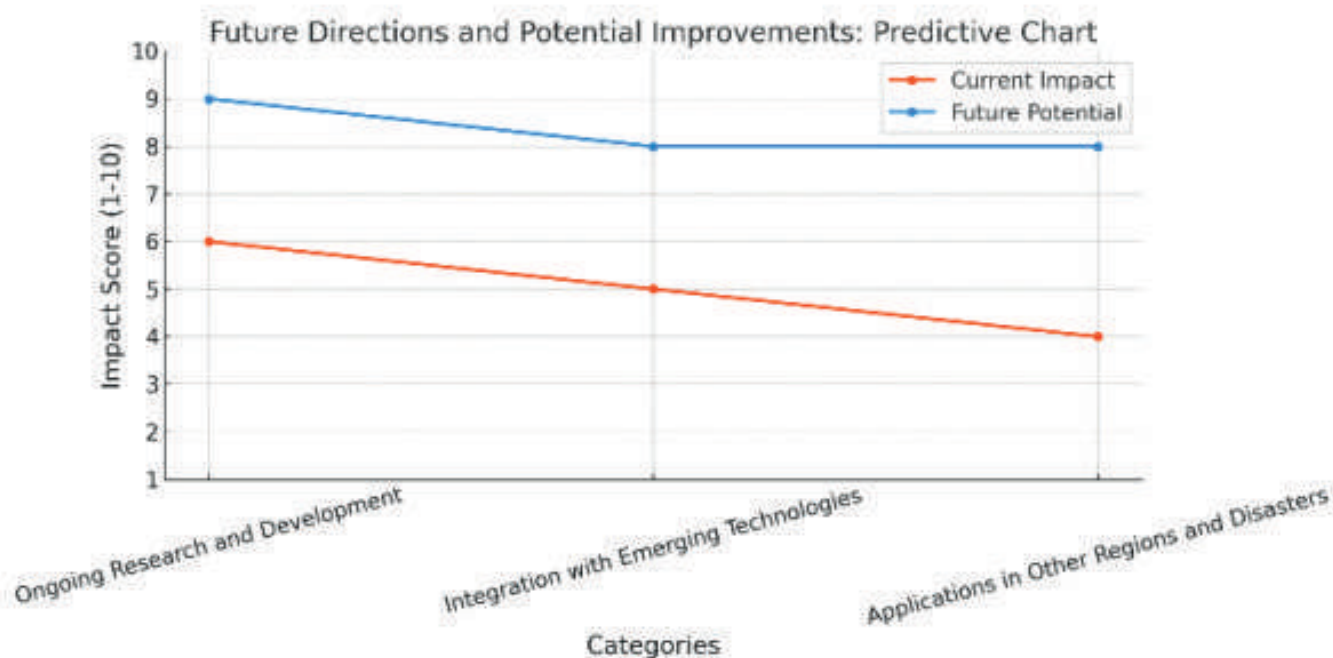
Za zagotovitev učinkovite integracije AI v upravljanje gozdnih požarov ta rezultat predstavlja nabor strateških priporočil politik, usmerjenih na institucionalne, tehnične in operativne ravni. Prvič, zahteva formalno sprejetje sistemov za podporo odločanju, ki jih poganja AI, znotraj javnih organov in služb za izredne dogodke, podprtih z interoperabilnimi digitalnimi infrastrukturami, ki omogočajo čezmejno koordinacijo v realnem času. Enako pomembna je vzpostavitev jasnih, standardiziranih protokolov za zbiranje, deljenje in uvajanje sistemov podatkov—zagotavljanje kompatibilnosti med agencijami in skladnosti s predpisi o zasebnosti, kot je GDPR.

Robusten regulativni okvir je bistven za vodenje etične in odgovorne uporabe napovednih tehnologij. To vključuje uveljavljanje načel transparentnosti, sledljivosti odločitev in človeškega nadzora v vseh delovnih tokovih, podprtih z AI. Prihodnji politični napor bi se morali tudi osredotočiti na zagotavljanje,

da se AI sistemi redno validirajo, vzdržujejo in posodablajo, da ostanejo učinkoviti pod razvijajočimi se podnebnimi pogoji in požarnimi režimi.

Ta priporočila so zlasti namenjena lokalnim organom, gasilskim enotam in odločevalcem, seznanjajo jih s praktičnimi navodili za izkoriščanje polnega potenciala AI in digitalnih orodij pri izboljšanju učinkovitosti, koordinacije in predvidevanja upravljanja tveganja zaradi gozdnih požarov.

Slika 4 - Prihodnje smeri in potencialne izboljšave: napovedni grafikon.



Naslednja priporočila zagotavljajo navodila za učinkovito sprejetje AI tehnologij v strategijah preprečevanja in upravljanja gozdnih požarov.

3.3.1 PRIPOROČILA ZA TEHNIČNO IMPLEMENTACIJO

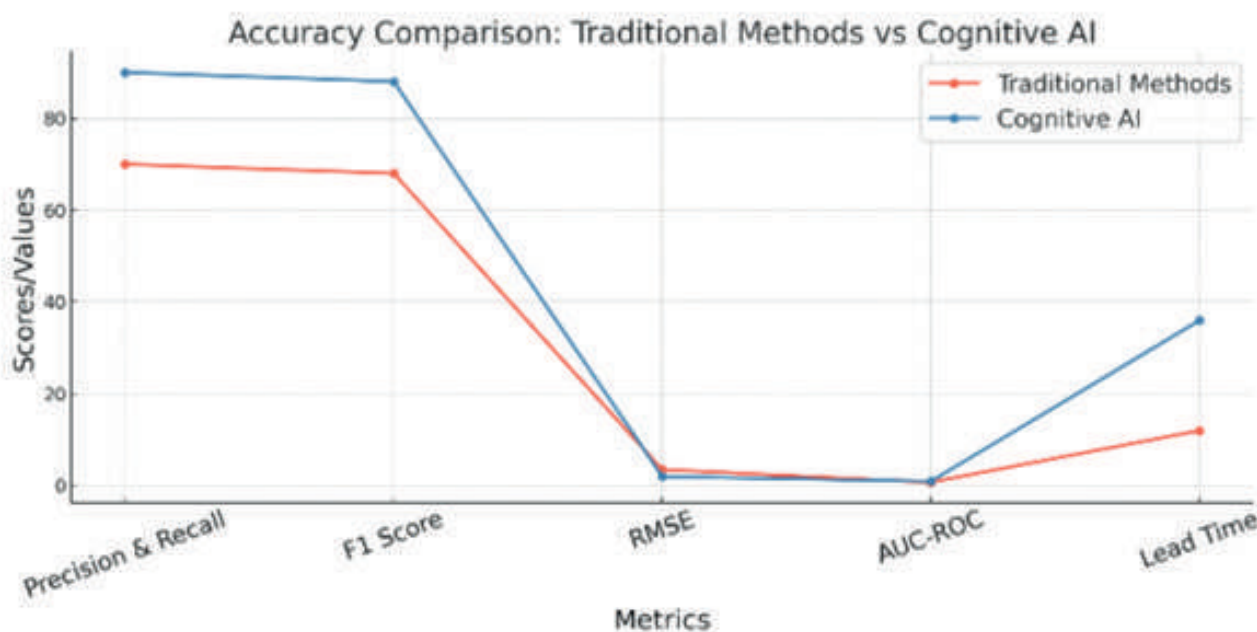
Integracija in uvajanje modela:

Implementirati napovedni model XGBoost znotraj obstoječih operativnih okvirov preko faznega pristopa:

- Faza 1 (Meseci 1-3): Izvajati modele vzporedno s tradicionalnimi metodami, primerjati izhode s tedenskimi primerjalnimi analizami.

- Faza 2 (Meseci 4-6): Uporabiti izhode modela kot dodatno podporo odločanju, z gozdarskimi oddelki, odgovornimi za validacijo.
- Faza 3 (Meseci 7-12): Integrirati napovedi modela v standardne operativne postopke, s skupnim tehničnim odborom, ki nadzoruje učinkovitost.

Slika 5 - Primerjava natančnosti: tradicionalne metode v primerjavi s kognitivno AI (črtni grafikon).



Infrastruktura upravljanja podatkov:

- Vzpostaviti standardizirane protokole zbiranja podatkov med slovenskimi in italijanskimi agencijami za zagotovitev konsistentnosti vhodov modela.
- Razviti avtomatizirane podatkovne cevovode, ki zagotavljajo informacije o vremenu v realnem času v napovedne modele z minimalnim ročnim posegom.
- Implementirati enotno čezmejno strukturo baze podatkov, ki kombinira:
 - MySQL za strukturirane dnevnike incidentov gozdnih požarov.
 - InfluxDB za visokofrekvenčne vremenske časovne vrste podatkov.

Uporabniški vmesnik in dostopnost:

- Uvesti Karst Firewall 5.0 spletni portal v vse relevantne agencije z dostopom na podlagi vlog, ki nadzoruje podrobnosti informacij in pragove opozoril.
- Razviti mobilne aplikacije, ki zagotavljajo osebju na terenu dostop v realnem času do izhodov napovedi in priporočil za odziv.
- Ustvariti poenostavljene vizualizacijske nadzorne plošče, ki komunicirajo kompleksne izhode modela v izvedljivih formatih za odločevalce.

3.3.2 STRATEGIJE ORGANIZACIJSKE UPORABE

Usposabljanje in razvoj zmožnosti:

Implementirati večstopenjski program usposabljanja:

- Izvršna raven: Osredotočenje na strateške posledice in interpretacijo izhodov.
- Operativna raven: Podrobna navodila o integraciji napovedi v dnevne odločitve.
- Tehnična raven: Poglobljeno razumevanje zmožnosti in omejitev modela.

Pristop upravljanja sprememb:

- Identificirati in opolnomočiti "AI prvake" znotraj vsake organizacije za lažjo sprejetje.
- Vzpostaviti formalne mehanizme za povratne informacije za osebje na terenu za poročanje o natančnosti modela in predlaganje izboljšav.
- Razviti primerjalne matrike, ki kažejo dodano vrednost AI napovedi v primerjavi s tradicionalnimi metodami.

Upravljanje znanja:

- Dokumentirati študije primerov uspešnih aplikacij modela za gradnjo institucionalnega znanja.
- Ustvariti čezmejno skupnost prakse za deljenje izkušenj in najboljših praks v upravljanju gozdnih požarov, podprtem z AI.

3.3.3 PRIPOROČILA POLITIK IN UPRAVLJANJA

Regulativni okvir:

Uskladiti sprejetje AI z načeli EU AI Act (Evropska komisija, 2023), zagotavljati:

- Transparentnost: Dokumentirati metodologije in omejitve modela.
- Človeški nadzor: Ohranjati končno odločitveno avtoriteto z izkušenim osebjem.
- Odgovornost: Vzpostaviti jasne strukture odgovornosti za odločitve, obveščene z AI.

Financiranje in dodelitev virov:

- Dodeliti 5-8% letnih proračunov upravljanja gozdnih požarov za vzdrževanje in izboljšanje AI sistema.
- Razviti skupne finančne mehanizme, ki podpirajo čezmejno AI infrastrukturo.

- Prioritizirati naložbe v:
 - Izboljšanje kakovosti podatkov.
 - Ponovno usposabljanje in validacijo modela.
 - Izboljšanje uporabniškega vmesnika.

Čezmejno upravljanje:

Vzpostaviti skupni tehnični odbor, odgovoren za:

- Odobranje posodobitev modela.
- Določanje standardov podatkov.
- Pregled učinkovitosti sistema.
- Priporočanje prilagoditev politik.

3.3.4 ETIČNI IN OPERATIVNI VIDIKI

Uravnoteženje AI in strokovne presoje:

- Vzpostaviti jasne smernice, ki presodijo AI orodja kot podporo pri odločanju namesto nadomestkov za strokovno presojo.
- Razviti protokole za primere, kjer se AI napovedi in strokovna mnenja razlikujejo.
- Dokumentirati razloge za odločitve, ko se preglasijo priporočila modela, za ustvarjanje priložnosti učenja.

Obravnavanje omejitev modela:

Implementirati dodatne protokole za obravnavanje znanih omejitev modela:

- Povečana pozornost za tipe požarov, ki so v zgodovinskih podatkih premalo zastopani.
- Posebna pozornost na 19% potencialnih lažno negativnih v modelu XGBoost.
- Sezonske prilagoditve na podlagi podnebnih trendov, ki niso v celoti zajeti v zgodovinskih podatkih.

Zasebnost in varstvo podatkov:

- Zagotoviti, da vse zbiranje in uporaba podatkov ustreza GDPR in relevantnim nacionalnim predpisom.
- Razviti protokole anonimizacije za občutljive podatke, vključene v modele.

3.4 OKVIR ČEZMEJNEGA SODELOVANJA

Učinkovita implementacija smernic in priporočil, opisanih zgoraj, zahteva strukturiran pristop k čezmejnemu sodelovanju. Naslednji okvir zagotavlja temelje za to sodelovanje.

3.4.1 ENOTNO DELJENJE INFORMACIJ

Izmenjava podatkov v realnem času:

- Implementirati standardizirane formate podatkov in protokole izmenjave med slovenskimi in italijanskimi agencijami.
- Vzpostaviti dvostranske sporazume za takojšnje deljenje:
 - Podatkov vremenskih postaj.
 - Opozoril sistemov zaznavanja.
 - Stanja razporeditve virov.
 - Napovedi modela.

Zmožnosti skupne analize:

Ustvariti čezmejno analitično ekipo s predstavniki obeh držav, odgovorno za:

- Spremljanje učinkovitosti modela.
- Validacijo napovedi.
- Sintezo vpogledov iz več virov podatkov.
- Zagotavljanje usklajenih priporočil.

3.4.2 USKLAJENI ODZIVNI MEHANIZMI

Enotna poveljniška struktura:

Razviti protokole za vzpostavitev skupnega poveljstva pri čezmejnih incidentih na podlagi:

- Napovedane smeri širjenja iz simulacij Prometheus.
- Razpoložljivosti virov.
- Jurisdikcijskih upoštevanj.

Sporazumi o deljenju virov:

Formalizirati sporazume za čezmejno razporejanje:

- Zračnih virov.

- Specializirane opreme.
- Osebja.

Vzpostaviti standardizirane postopke zahtev, aktivirane s specifičnimi pragovi v napovednih modelih.

Skupno usposabljanje in vaje:

- Izvajati letne čezmejne vaje na podlagi scenarijev, izpeljanih iz:
 - Zgodovinskih vzorcev požarov.
 - Projekcij podnebnih sprememb.
 - Simulacij Prometheus.
- Vključiti interpretacijo AI napovedi v vse skupne usposabljalne aktivnosti.

3.4.3 HARMONIZACIJA POLITIK

Usklajene strategije preprečevanja:

- Koordinirati dejavnosti upravljanja goriva na podlagi čezmejnega kartiranja ranljivosti.
- Razviti kompatibilne kampanje ozaveščanja javnosti, ki predstavljajo dosledna sporočila čez meje.

Standardizirane ravni opozorila:

Implementirati enotni sistem opozoril na podlagi verjetnosti napovedi XGBoost:

- Raven 1: 50-70% verjetnosti.
- Raven 2: 70-85% verjetnosti.
- Raven 3: >85% verjetnosti.

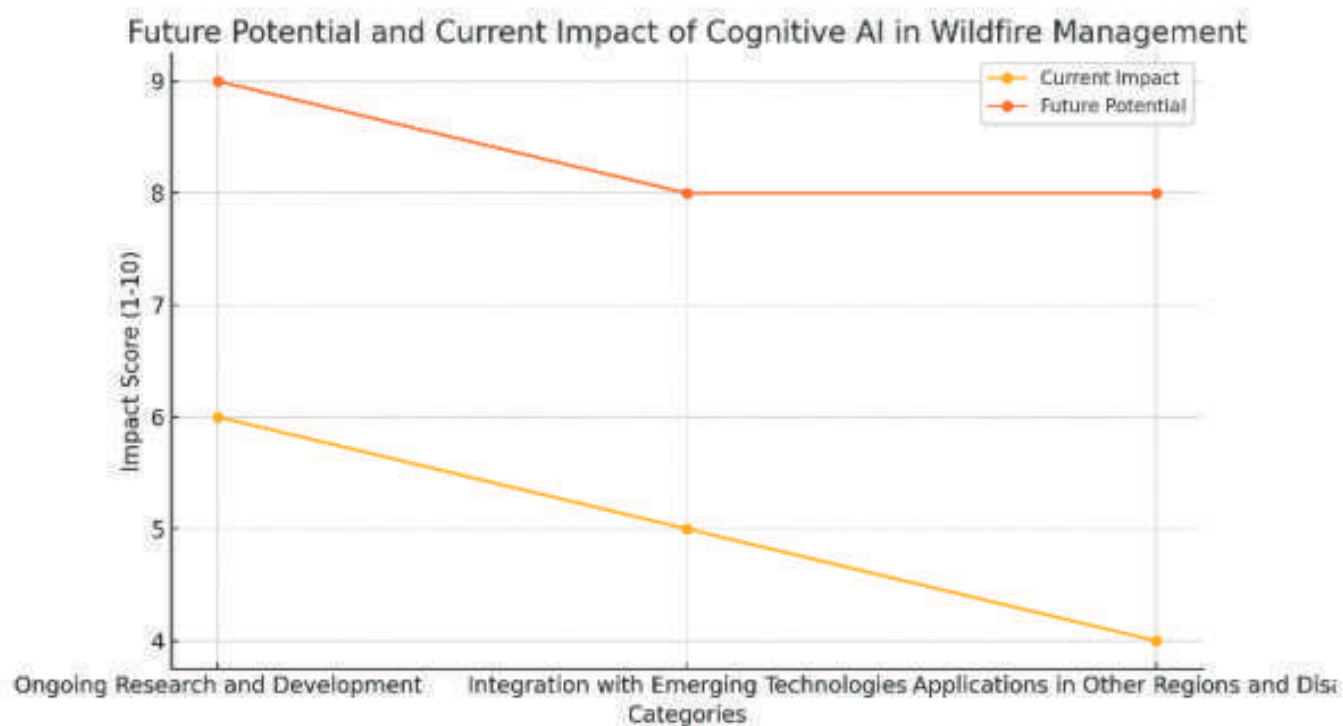
Uskladiti postopke javnega komuniciranja in mobilizacije agencij za vsako raven.

Proces vrednotenja in izboljšanja:

Vzpostaviti skupni letni proces pregleda za:

- Oceno učinkovitosti modela.
- Vrednotenje učinkovitosti dodelitve virov.
- Identificiranje ovir sodelovanja.
- Posodobitev protokolov na podlagi naučenih lekcij.
- Objavo ugotovitev za prispevek k širšemu znanju prilagajanja podnebjui EU.

Slika 6 - Prihodnji potencial in trenutni vpliv kognitivne AI pri upravljanju gozdnih požarov.



4 LITERATURA

- [1] ARPA FVG. (2023). Regional Climate Data 1993-2023. Friuli Venezia Giulia Environmental Protection Agency.
- [2] ARSO. (2023). Slovenian Meteorological Data Repository. Slovenian Environment Agency.
- [3] Canadian Forest Service. (2009). Fire Weather Index System and Prometheus Fire Growth Model. Natural Resources Canada.
- [4] European Commission. (2023). EU AI Act: Regulatory Framework for Artificial Intelligence. European Commission.
- [5] Hossain, M., & Rahman, T. Y. (2025). Cognitive AI for Wildfire Management in Southern California: Challenges and Potentials. *Journal of Science and Technology*, 10(2), 51-65. <https://doi.org/10.46243/jst.2025.v10.i02.pp51-65>
- [6] Progetto Karst Firewall 5.0. (2024a). Quadro di Collaborazione Transfrontaliera per la Gestione degli Incendi Boschivi. Programma di Cooperazione Italia-Slovenia.
- [7] Progetto Karst Firewall 5.0. (2024b). Deliverable 1.1.2: Valutazione di Pericolo e Vulnerabilità degli Incendi Boschivi Sotto il Cambiamento Climatico nella Regione del Carso. Programma di Cooperazione Italia-Slovenia.
- [8] Progetto Karst Firewall 5.0. (2025). Deliverable 1.2.1: Algoritmi AI Predittivi per il Rischio di Incendi Boschivi. Programma di Cooperazione Italia-Slovenia.
- [9] Saxena, V. (2025). AI-Driven Wildfire Management: An Integrated Approach to Detection, Prevention, and Response. *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*, 11, 2125-2133. <https://doi.org/10.32628/CSEIT251112178>
- [10] Slovenian Forest Service (ZGS). (2024). Historical Wildfire Data 1990-2024. Ministry of Agriculture, Forestry and Food.
- [11] Wiggins, L., Zhang, H., Montgomery, K., & Patel, S. (2020). XGBoost Applications in Environmental Risk Prediction. *Journal of Machine Learning for Environmental Sciences*, 15(3), 256-270.