Interreg Italia-Slovenija
Karst Firewall 5.0

Cofinanziato dall'Unione europea
Sofinancira Evropska unija

Soluzione innovativa per la prevenzione e l'allarme precoce degli incendi carsici (O.2.1)

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 SUL PROGETTO / 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 dell'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, la prevenzione dei rischi 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:	OUTPUT 2.1
Titolo del documento / Naslov dokumenta:	Soluzione innovativa per la prevenzione e l'allarme precoce degli incendi carsici Inovativna rešitev za preprečevanje kraških požarov in zgodnje opozarjanje
Work Package:	2
Attività / Aktivnost:	Output 2.1 — Indicatore 2.1.1; Periodo 4, mesi 19–24
Partner responsabili (autori) / Odgovorni partnerji (avtorji):	PP2 — Infordata Sistemi Srl; con il contributo di IUAV (LP), ZRC SAZU, Comune di Duino-Aurisina, Občina Miren-Kostanjevica e KID PiNA
Luogo e data di pubblicazione / Kraj in datum objave:	Luglio 2026 — versione 0.1 (bozza)

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

SCHEDA DELL' OUTPUT

Campo	Valore
Numero dell'output	2.1
Titolo output	Soluzione innovativa per la prevenzione e l'allarme precoce degli incendi carsici
Indicatore output programma	2.1.1 — Azioni pilota sviluppate congiuntamente e implementate dai progetti
Unità di misura	azioni pilota
Valore obiettivo output	2,00
Periodo di consegna	Periodo 4, mesi 19–24

Descrizione dell'output (da Application Form). La soluzione innovativa per la prevenzione e l'allerta precoce degli incendi carsici comprende un sistema completo che integra tecnologie avanzate, analisi dei dati e strategie di comunicazione efficienti per rilevare, prevenire e gestire efficacemente gli incendi nella landa carsica. Le caratteristiche principali sono: piattaforma digitale integrata, sistemi di monitoraggio in tempo reale, algoritmi di apprendimento automatico, sistemi di allarme precoce e analisi e visualizzazione dei dati.

Perimetro del documento. Il presente output descrive la soluzione digitale sviluppata nell'ambito delle attività di progetto Karst Firewall 5.0. Il simulatore di propagazione PyroWISE, sviluppato come attività extra rispetto al perimetro progettuale, non è oggetto del presente documento. È invece incluso il sistema informativo pubblico della piattaforma (indice K-FWI, allerte MeteoAlarm e altri dati pubblici del portale https://kf50.infordata.it/portal).

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

ABBREVIAZIONI

Sigla	Significato
ARPA FVG	Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente del Friuli Venezia Giulia (IT)
ARSO	Agencija Republike Slovenije za okolje (SLO)
AOI	Area of Interest — area operativa di riferimento
EFFIS	European Forest Fire Information System
FWI	Fire Weather Index (sistema canadese: FFMC, DMC, DC, ISI, BUI)
K-FWI	Karst Fire Weather Index — indice FWI calibrato per il Carso, arricchito con modello ML di ignizione
GDPR	Regolamento Generale sulla Protezione dei Dati (UE 2016/679)
INSPIRE	Direttiva 2007/2/CE per l'infrastruttura per l'informazione territoriale in Europa
IoT	Internet of Things
LoRa	Long Range — protocollo radio a lungo raggio e bassa potenza
MeteoAlarm	Rete europea di allertamento meteo (EUMETNET)
ML	Machine Learning
RBAC	Role-Based Access Control
URSZR	Uprava RS za zaščito in reševanje (SLO)
XGBoost	eXtreme Gradient Boosting
ZGS	Zavod za gozdove Slovenije
ZRC SAZU	Znanstvenoraziskovalni center Slovenske akademije znanosti in umetnosti

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

SCHEDA DELL' OUTPUT **3**
ABBREVIAZIONI **4**
1 ABSTRACT **7**
2 OBIETTIVI E CONTESTO **8**
2.1 Il problema 8
2.2 Obiettivi della soluzione 8
2.3 Le due azioni pilota 9
3 ARCHITETTURA DELLA SOLUZIONE **9**
3.1 Visione d'insieme 9
3.2 Sicurezza, ruoli e multilinguismo 10
4 LA BASE DATI TRANSFRONTALIERA (da D2.1.2) **10**
4.1 I numeri del dataset 10
4.2 Cosa raccontano i dati 11
5 ALGORITMI DI APPRENDIMENTO AUTOMATICO E K-FWI **12**
5.1 Dal FWI generico al modello locale (D1.2.1) 12
5.2 Il Karst Fire Weather Index (K-FWI) 13
5.3 Conformità etica e AI Act 13
6 SISTEMI DI MONITORAGGIO IN TEMPO REALE **14**
6.1 Rete meteorologica 14
6.2 Rete sensoristica IoT — i "nasi elettronici" 14
6.3 Osservazione satellitare e fonti esterne 15
7 SISTEMA DI ALLARME PRECOCE **15**
7.1 Matrice di allerta e notifiche 15
7.2 MeteoAlarm transfrontaliero 15
7.3 Livelli di risposta raccomandati (D1.2.2) 16
8 ANALISI E VISUALIZZAZIONE DEI DATI **16**
8.1 Strumenti operativi 16
8.2 Statistiche e analisi 17
9 IL SISTEMA INFORMATIVO PUBBLICO — https://kf50.infordata.it/portal **17**
10 RISULTATI PRELIMINARI DELLA MESSA IN OPERA **18**
10.1 Adozione da parte degli enti 18
10.2 Registro operativo transfrontaliero 18
10.3 Utilizzo del portale pubblico 19

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

10.4 Validazione con gli stakeholder (D.2.3.3) 19
10.5 Dispiegamenti sul campo 19
11 LINEE GUIDA E GOVERNANCE (da D1.2.2) 20
12 CONCLUSIONI E SVILUPPI 20
RIFERIMENTI 21

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

1 ABSTRACT

L'Output 2.1 presenta la **soluzione innovativa per la prevenzione e l'allarme precoce degli incendi carsici** sviluppata dal progetto Karst Firewall 5.0: una piattaforma digitale transfrontaliera che integra in un unico sistema operativo la prima base dati storica congiunta Italia–Slovenia sugli incendi del Carso, una rete di monitoraggio meteorologico e sensoristico in tempo reale, algoritmi predittivi di apprendimento automatico calibrati sul territorio carsico, un sistema strutturato di allarme precoce multicanale e strumenti di analisi e visualizzazione dei dati (mappe 2D/3D, statistiche, cruscotti operativi).

La soluzione risponde a un problema concreto emerso con drammaticità negli incendi dell'estate 2022: il fuoco sul Carso non riconosce i confini amministrativi, mentre i dati, gli strumenti e le procedure dei due Paesi sono rimasti per decenni separati. La piattaforma unifica oltre **5,2 milioni di record meteorologici** (1991–2024, 22 stazioni), **3.958 registrazioni di incendi boschivi** (1995–2023) e oltre **50 layer geospaziali** in un sistema che ogni giorno calcola e pubblica il rischio incendi sull'intera area transfrontaliera.

Il cuore predittivo della soluzione è il **Karst Fire Weather Index (K-FWI)**: un indice di pericolo che unisce la severità meteorologica FWI, ricalibrata sulle soglie reali del Carso, a un modello di ignizione ML addestrato sulla storia degli incendi locali. L'analisi condotta dal progetto ha infatti dimostrato che il **97,3% degli incendi carsici si sviluppa al di sotto delle soglie generiche europee di pericolo "alto"**: la calibrazione locale non è un'ottimizzazione, ma una necessità operativa. Il sistema combinato rileva il **77,5% degli incendi**, contro il **29%** di un approccio basato sul solo FWI meteorologico.

La messa in opera è avviata: la piattaforma operativa e il portale pubblico sono online in quattro lingue (IT/SL/EN/DE), **33 organizzazioni ed enti** dispongono di utenze approvate, il registro operativo censisce **423 sedi e 410 squadre** antincendio dei due Paesi, la rete IoT conta **77 sensori** registrati e il portale pubblico ha servito **3.537 visualizzazioni da 768 visitatori unici** negli ultimi 30 giorni. La validazione con gli stakeholder (deliverable D.2.3.3) ha confermato la coerenza territoriale dello strumento (71% "largamente coerente") e la sua utilità operativa percepita (7/7 tra gli operatori sloveni).

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

2 OBIETTIVI E CONTESTO

2.1 Il problema

L'altopiano carsico (~1.000 km², 30% in Italia e 70% in Slovenia) è un ecosistema unico e ad alto rischio: substrato calcareo che drena rapidamente le precipitazioni, vegetazione con forte presenza di conifere infiammabili ereditata dai rimboschimenti ottocenteschi, bora che accelera la propagazione, e una fitta interfaccia urbano-forestale. Il cambiamento climatico aggrava il quadro: le analisi del progetto documentano un **riscaldamento di +0,57 °C per decennio (1993–2023)**, con i record storici di temperatura del 2024 su entrambi i versanti, e un incremento della radiazione solare media.

A fronte di un rischio che ignora il confine, la capacità informativa era frammentata: coordinate in sistemi diversi (UTM 33N in Italia, D96/TM in Slovenia), classificazioni degli incendi non allineate, serie meteorologiche con frequenze e protocolli differenti, nessuno strumento condiviso di previsione o allarme.

2.2 Obiettivi della soluzione

1. **Unificare la conoscenza**: costruire la prima base dati transfrontaliera armonizzata su incendi, meteo e territorio del Carso (deliverable D2.1.2).
2. **Prevedere il rischio**: sviluppare algoritmi predittivi calibrati sul territorio (deliverable D1.2.1) e portarli a livello operativo con il K-FWI.
3. **Monitorare in tempo reale**: collegare stazioni meteorologiche, sensori IoT e fonti satellitari in un unico flusso informativo.
4. **Allertare precocemente**: instradare automaticamente gli allarmi verso gli operatori competenti nei due Paesi, con tracciabilità completa.
5. **Rendere accessibile l'informazione**: pubblicare il rischio e i dati ambientali su un portale pubblico multilingue per cittadini, ricercatori e amministrazioni.
6. **Guidare l'allocazione delle risorse**: tradurre le previsioni in linee guida operative e raccomandazioni di policy (deliverable D1.2.2).

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

2.3 Le due azioni pilota

L'output si concretizza nelle **due azioni pilota congiunte** previste dall'indicatore 2.1.1, sviluppate e implementate congiuntamente dai partner dei due Paesi:

Azione pilota	Contenuto	Territori
1 — Sistema digitale di gestione del rischio	Piattaforma integrata (base dati transfrontaliera, K-FWI, allarme precoce, portale pubblico)	Intera area transfrontaliera del Carso
2 — Rete di monitoraggio sul campo	Stazioni meteo integrate, rete sensori IoT ("nasi elettronici"), registro operativo condiviso	Siti pilota nei Comuni di Duino-Aurisina e Miren-Kostanjevica

Tabella 1 - Descrizione delle due azioni pilota del progetto e dei relativi territori di applicazione.

3 ARCHITETTURA DELLA SOLUZIONE

3.1 Visione d'insieme

La soluzione è organizzata in cinque componenti che condividono la stessa area operativa transfrontaliera (AOI "Carso Italia-Slovenia") e gli stessi contratti dati:

Componente	Funzione	Capitolo
Base dati transfrontaliera	Memoria storica armonizzata: incendi, meteo, territorio	§4
Modelli predittivi / K-FWI	Calcolo giornaliero del rischio per cella sull'intera AOI	§5
Monitoraggio in tempo reale	Stazioni meteo, sensori IoT, fonti satellitari, MeteoAlarm	§6
Sistema di allarme precoce	Matrice di allerta, notifiche multicanale, creazione incidenti	§7
Analisi e visualizzazione	Mappe 2D/3D, statistiche, cruscotti, portale pubblico	§8–9

Tabella 2 - Visione d'insieme dei componenti principali dell'architettura della soluzione e delle loro funzioni.

L'architettura software separa i servizi per responsabilità: l'applicazione principale (cockpit operativo, RBAC, GIS) dialoga via HTTP con il servizio di ingestione meteo (fonti ARSO, ARPA FVG, ARPA Veneto e altre), con il servizio K-FWI e con il gateway della sensoristica IoT/LoRa. I dati sono persistiti su un'architettura a doppio database — **MySQL** per registri strutturati (incendi, organizzazioni, asset) e **InfluxDB** per le serie temporali meteorologiche ad alta frequenza — scelta che unisce profondità analitica e prestazioni in tempo reale.

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

3.2 Sicurezza, ruoli e multilinguismo

- **RBAC**: controllo degli accessi basato sui ruoli per operatori, amministratori, gestori comunali, ricercatori e visualizzatori; le organizzazioni partner definiscono politiche granulari di accesso alle risorse.
- **Privacy by design**: i layer cartografici pubblici sono privi di contatti personali; i dati di contatto operativi restano riservati alle viste autenticate, in conformità GDPR.
- **Multilinguismo**: interfaccia operativa e portale pubblico in **italiano, sloveno, inglese e tedesco**, con selettore di lingua persistente; la parità delle traduzioni IT/SL è verificata automaticamente in fase di build.
- **Osservabilità**: endpoint di health-check con verifica dei flussi critici (es. heartbeat del canale MeteoAlarm), per far emergere eventuali interruzioni entro pochi minuti.

4 LA BASE DATI TRANSFRONTALIERA (da D2.1.2)

4.1 I numeri del dataset

Indicatore	Valore
Record meteorologici storici	**5.229.216** (campionamento misto 30–60 min)
Stazioni meteorologiche della rete storica	**22** (12 ARSO, 10 ARPA FVG)
Copertura temporale meteo	1991–2024 (34 anni; 8 stazioni con 20+ anni)
Registrazioni incendi boschivi	**3.958** (1995–2023), georeferenziazione 100%
Superficie totale bruciata (1995–2023)	**53.074 ha**
Layer geospaziali	**50+** (uso suolo, DTM, viabilità, infrastrutture, vegetazione)
Griglia di lavoro	3 m × 3 m (DTM fino a 1 m; output rischio aggregati a 100 m)
Completezza serie meteo	94,2% (99,1% dei valori entro range fisici)

Tabella 3 - Numeri e indicatori principali del dataset

L'armonizzazione ha richiesto la riproiezione di tutti i dati nel sistema unificato WGS84 (EPSG:4326) preservando i sistemi originali (UTM 33N italiano, D96/TM sloveno), il riallineamento delle classificazioni nazionali degli incendi e la normalizzazione delle frequenze di campionamento. Il dataset è conforme agli standard **INSPIRE**, **ISO 19115/19139** e **DCAT-AP**, con metadati multilingue e catalogo CSW, e si integra con i sistemi europei EFFIS, Copernicus e GWIS per la validazione incrociata.

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

4.2 Cosa raccontano i dati

Distribuzione dimensionale degli incendi (1995–2023):

Categoria	N. eventi	Area media (ha)	% eventi
≤ 1 ha (piccolissimi)	2.972	0,24	75,09%
1,1–10 ha (piccoli)	791	3,15	19,98%
10,1–100 ha (medi)	161	31,73	4,07%
100,1–1.000 ha (grandi)	27	240,45	0,68%
1.000–10.000 ha (molto grandi)	6	3.464,80	0,15%
> 10.000 ha (estremi)	1	17.482,00	0,03%

Tabella 4 - Distribuzione dimensionale degli incendi storici registrati nel periodo 1995-2023.

La distribuzione è fortemente asimmetrica: gli incendi grandi (>100 ha) sono lo **0,86% degli eventi ma l'84,34% dell'area bruciata**. L'evento estremo del 2022 ha bruciato per 7 giorni consecutivi.

Stagionalità:

Stagione	N. eventi	Area media (ha)	%
Primavera (mar–mag)	1.616	8,55	40,83%
Estate (giu–ago)	1.388	26,74	35,07%
Inverno (dic–feb)	695	2,25	17,56%
Autunno (set–nov)	259	2,19	6,54%

Tabella 5 - Distribuzione stagionale degli incendi storici sul territorio.

Distribuzione geografica: Slovenia 2.751 eventi (69,5%, area media 15,87 ha); Italia 1.207 eventi (30,5%, area media 7,79 ha). Gli incendi più estremi si sono sviluppati sul lato sloveno in due terzi dei casi.

Tempi di risposta: il 63,2% degli interventi è attivato immediatamente e l'83% entro 2 ore — un dato che conferma l'efficacia della macchina operativa e sposta il valore aggiunto della soluzione sulla **previsione** e sull'**anticipo dell'allarme**.

Cause: circa il **75% degli eventi ha matrice antropica** (infrastrutture viarie e ferroviarie, dolo, pratiche agricole); il 67,4% degli incendi storici si è sviluppato entro 50 m da una strada. Ciò che è prevedibile è prevenibile: la prossimità alle infrastrutture è uno dei predittori più forti usati dai modelli.

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

5 ALGORITMI DI APPRENDIMENTO AUTOMATICO E K-FWI

5.1 Dal FWI generico al modello locale (D1.2.1)

Il progetto è partito dal Fire Weather Index canadese — lo standard europeo di valutazione del pericolo — e ne ha misurato i limiti sul Carso: le condizioni locali (bora, suoli carsici a rapido drenaggio, combustibili fini) producono incendi anche con FWI formalmente moderato. Sono state quindi testate diverse classi di algoritmi ML (modelli lineari, probabilistici, K-Nearest Neighbors, modelli ad albero) su dataset costruiti con finestre temporali crescenti di dati meteorologici pre-evento.

Risultati della sperimentazione (D1.2.1):

Modello	Metrica	1 giorno	1 settimana	1 mese
Albero decisionale	Precisione	0,68	0,66	0,65
Albero decisionale	Richiamo	0,59	0,52	0,47
Random Forest	Precisione	0,73	0,70	0,67
Random Forest	Richiamo	0,65	0,58	0,53
XGBoost	Precisione	0,75	0,70	0,68
XGBoost	Richiamo	0,69	0,65	0,61

Tabella 6 - Risultati della sperimentazione e metriche di prestazione dei modelli predittivi di apprendimento automatico.

Dopo ottimizzazione (bilanciamento delle classi, feature engineering, tuning), la configurazione migliore — **XGBoost su finestra meteorologica di 3 settimane** — ha raggiunto **accuratezza 90% e richiamo 81%** (D1.2.1); l'iterazione successiva del modello, addestrata sul dataset consolidato, riporta **accuratezza 97%, richiamo 83%, precisione 81%, F1 82%** (D2.1.2, XGBoost su split temporale 1995–2020 training / 2021–2023 validazione, k-fold stratificato k=5). Le variabili più influenti risultano temperatura, velocità del vento, umidità e radiazione solare — in linea con la comprensione meteorologica del fenomeno.

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

5.2 Il Karst Fire Weather Index (K-FWI)

Il livello operativo della previsione è il **K-FWI**, che combina:

- la **severità meteorologica FWI** ricalibrata sulle soglie effettive del Carso;
- un **modello spazio-temporale di ignizione** (Random Forest) con feature di densità storica degli hotspot e distanza dalle infrastrutture, con campionamento stagionale corretto;
- le **previsioni FWI Copernicus** per l'orizzonte a breve termine.

Prestazioni documentate del layer K-FWI:

Indicatore	Valore
Rilevamento incendi (modello combinato)	**77,5%**
Baseline solo-FWI	29%
AUC modello di ignizione (cross-validation spaziale a blocchi)	**0,89**
AUC su incendi sloveni out-of-domain	0,94
Incendi sotto le soglie generiche europee "High"	**97,3%**

Tabella 7 - Indicatori e prestazioni documentate dell'indice predittivo Karst Fire Weather Index (K-FWI).

Quest'ultimo dato è la giustificazione scientifica dell'intero approccio: senza calibrazione locale, quasi tutti gli incendi carsici avvengono in giornate che i sistemi europei generici non classificano come pericolose.

Ogni mattina il sistema suddivide l'AOI in celle, calcola per ciascuna la probabilità di incendio del giorno e pubblica la **mappa del rischio a tre livelli (rosso/giallo/verde)** sulla mappa operativa e sul portale pubblico. Le mappe di rischio giornaliere sono prodotte a risoluzione 100 m (aggregazione dalla griglia di lavoro a 3 m) con orizzonte previsionale fino a 7 giorni.

5.3 Conformità etica e AI Act

L'uso dell'IA aderisce ai principi dell'**EU AI Act**: trasparenza (metodologie e limiti documentati), supervisione umana (le previsioni sono supporto decisionale, non sostituzione dell'esperto), responsabilità (tracciabilità delle decisioni). I modelli evolvono con validazioni periodiche e i limiti noti — in particolare i falsi negativi — sono gestiti con protocolli operativi dedicati (cfr. §10 e D1.2.2).

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

6 SISTEMI DI MONITORAGGIO IN TEMPO REALE

6.1 Rete meteorologica

Il servizio di ingestione meteo alimenta la piattaforma con i dati di stazioni **ARSO, ARPA FVG, ARPA Veneto e fonti aggiuntive**; il catalogo stazioni gestito in piattaforma conta oggi **753 stazioni** censite, delle quali 22 costituiscono la rete storica di riferimento dell'area carsica. I dati (temperatura, umidità, pressione, vento, pioggia, radiazione) confluiscono in InfluxDB e sono esposti con serie storiche per stazione, statistiche per Paese, tendenze mensili, giorni secchi, rosa dei venti e calcolo FWI per stazione.

6.2 Rete sensoristica IoT — i "nasi elettronici"

La componente di campo comprende gateway e sensori **LoRa** a energia solare, capaci di operare per mesi in zone remote prive di connettività: rilevano temperatura, umidità, pressione e concentrazioni di gas, "annusando" l'impronta chimica della fase iniziale di un incendio e trasmettendo l'allerta via radio alla piattaforma.

Stato attuale della rete (dashboard, luglio 2026):

Stato sensori	N.
Live (in trasmissione regolare)	**56**
Idle	4
Offline	11
Mai attivati	6
Totale registrati	**77**

Tabella 8 - Stato di attività della rete sensoristica IoT (i "nasi elettronici") aggiornato a luglio 2026.

Intervallo medio di trasmissione: **172 secondi**. La rete è governata da un layer dedicato con stato dei nodi derivato server-side (healthy/degraded/alert/offline/maintenance), triage degli allarmi con timeline delle evidenze, monitoraggio di affidabilità (disponibilità 24h/7g/30g, diagnostica di cadenza e gap, rilevamento anomalie) e notifiche edge-triggered.

Il dispiegamento è supportato da un **pianificatore di posizionamento**: un ottimizzatore che suggerisce le posizioni ottimali dei sensori sull'AOI in base a rischio, copertura radio, esposizione solare e manutenibilità, con esportazione Excel per le squadre di campo e tracciamento del ciclo di vita di ogni sito (pianificato → approvato → installato → attivo). Un'API REST dedicata supporta le app mobili di campo per installazione e manutenzione (foto di installazione, lookup via QR, test di connessione post-installazione).

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

6.3 Osservazione satellitare e fonti esterne

- **Copernicus/Sentinel**: aggiornamento periodico di vegetazione e suolo; previsioni FWI per il K-FWI; mappatura delle aree bruciate e della rigenerazione vegetale (attività ZRC SAZU con droni e piattaforme GIS, con approfondimenti sui Comuni di Miren-Kostanjevica, Komen e Duino-Aurisina).
- **Rilevamenti satellitari attivi (FIRMS/VIIRS)**: le detezioni di fuochi attivi proposte arrivano in un widget di triage operatore nel cruscotto, per conferma o scarto.
- **Telecamere pubbliche Protezione Civile FVG**: catalogo di telecamere di monitoraggio (con cache delle miniature e calibrazione ROI/privacy), a supporto della verifica visuale.
- **MeteoAlarm**: cfr. §7.2.

7 SISTEMA DI ALLARME PRECOCE

7.1 Matrice di allerta e notifiche

Il flusso di allarme è configurato tramite la **Matrice di Allerta**: per ogni condizione di trigger (rilevamento da modello IA, sensore, telecamera, soglia meteo) si definiscono frequenza, località incluse/escluse, destinatari o ruoli e canali di comunicazione. Al superamento della soglia:

1. il sistema genera l'allarme (natura della minaccia, momento del rilevamento, gravità);
2. lo instrada automaticamente agli stakeholder competenti (email automatiche; bozze multilingue IT/SL/EN/DE per i livelli medi+);
3. registra ogni notifica nei **log** (ID allarme, destinatario, canale, timestamp, stato di consegna) garantendo piena tracciabilità;
4. per gli allarmi critici crea automaticamente un **Incidente** con intervento, personale coinvolto e attrezzature — l'inizio di un processo di risposta strutturato e auditabile.

7.2 MeteoAlarm transfrontaliero

La piattaforma integra le allerte pubbliche **MeteoAlarm di Italia e Slovenia** attraverso due canali complementari: un sottoscrittore MQTT sempre attivo per l'aggiornamento in tempo quasi reale (sub-minuto) e una riconciliazione oraria via API REST/EDR che recupera eventuali messaggi persi e **disattiva le allerte superate o cancellate a monte**. Le allerte arancioni/rosse rilevanti per il rischio incendi (vento, caldo, siccità, temporali, incendi boschivi) sono **escalate automaticamente ad allarme di sistema** attraverso la stessa pipeline di notifica degli altri allarmi operatore. La sintesi delle allerte in corso per i due

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

Paesi è pubblicata anche sulla home del portale pubblico, deduplicata per (paese, regione, fenomeno).

7.3 Livelli di risposta raccomandati (D1.2.2)

Le linee guida di progetto traducono le probabilità dei modelli in protocolli operativi a livelli:

Livello	Probabilità prevista	Azione raccomandata
1	50–70%	Unità di ricognizione
2	70–85%	Squadre di intervento rapido in standby
3	> 85%	Pre-posizionamento della capacità di risposta completa

Tabella 9 - Livelli di risposta operativa raccomandati in base alle probabilità di incendio previste.

Con ulteriori soglie tecniche (es. FFMC > 90 + DMC > 60 → risorse aeree in standby) e l'indicazione di mantenere capacità minime ovunque per gestire l'incertezza residua del modello.

8 ANALISI E VISUALIZZAZIONE DEI DATI

8.1 Strumenti operativi

- **Mappa 2D operativa** — griglia K-FWI e palette giornaliera del rischio, popup per stazione (FWI, temperatura, umidità, vento, pioggia), squadre vicine, rosa dei venti, contesto ML (evidenza storica, esposizione infrastrutturale, zone vulnerabili).
- **Mappa 3D** — terreno Cesium su ortofoto FVG e slovene, layer commutabili (stazioni live, K-FWI, incidenti, MeteoAlarm, sedi operative, sensori, strade, fasce tagliafuoco, ferrovie, muretti a secco), filtri temporali sugli incendi storici, esportazioni PNG/PDF.
- **Cruscotto operativo** — KPI, incidenti attivi, squadre in servizio, salute sensori, triage detezioni satellitari, stato fasce tagliafuoco; striscia meteo localizzata in 4 lingue.
- **Registro incidenti** — anagrafica completa degli incendi attivi e storici (localizzazione, tempi, cause, vegetazione, meteo, danni e risposta), statistiche di superficie bruciata per mese/Paese/anno e confronto dell'anno corrente con le medie storiche.
- **Pianificazione interventi** — layer delle sedi operative dei due Paesi, ranking ETA per capacità/distanza/viabilità, selettore di percorso con attenzione alla viabilità forestale e alle dimensioni dei mezzi, punto di raduno raccomandato.
- **Registro operativo** — cfr. §10.2.

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

8.2 Statistiche e analisi

La piattaforma espone statistiche meteorologiche flessibili (per stazione o Paese; periodi 3–30 giorni o anno corrente), FWI degli ultimi 7 giorni, statistiche annuali (giorni secchi, precipitazioni cumulative, rosa dei venti), statistiche incendi (per dimensione, stagione, causa, Paese) e le tendenze climatiche di lungo periodo documentate in D1.2.1.

9 IL SISTEMA INFORMATIVO PUBBLICO — https://kf50.infordata.it/portal

Accanto al cockpit operativo riservato, la soluzione comprende un **portale pubblico multilingue (IT/SL/EN/DE)** che rende accessibili a cittadini, amministrazioni e comunità scientifica i dati e gli strumenti principali del progetto:

Sezione	Contenuto
Mappa del rischio (K-FWI)	Mappa giornaliera del pericolo incendi a tre livelli sull'intera area carsica
Allerte MeteoAlarm	Striscia di sintesi delle allerte meteo pubbliche IT+SI in corso, aggiornata in tempo quasi reale
Stazioni meteo	Dati e serie delle stazioni della rete transfrontaliera
Qualità dell'aria	Dati delle stazioni AirQino di Duino-Aurisina (SMART321/322/323) con layer termico interpolato
Storia degli incendi	Database storico consultabile degli incendi del Carso
Statistiche	Statistiche meteorologiche e sugli incendi
Early warning / Prevenzione / Guida	Contenuti informativi ed educativi sul rischio e sui comportamenti
Earth observation / Scienza / Ricerca	Divulgazione delle basi scientifiche del progetto
Glossario / Riferimenti	Terminologia e fonti
API (Swagger)	Documentazione OpenAPI degli endpoint pubblici — i dati sono riutilizzabili da terzi
Feedback	Canale di raccolta segnalazioni degli utenti
Mappa 3D	Versione pubblica della visualizzazione tridimensionale

Tabella 10 - Struttura delle sezioni e dei contenuti dal portale del sistema informativo pubblico.

Il portale espone inoltre **endpoint GeoJSON pubblici** (privi di dati di contatto) per l'interoperabilità con sistemi esterni e QGIS.

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

10 RISULTATI PRELIMINARI DELLA MESSA IN OPERA

10.1 Adozione da parte degli enti

Alla data di redazione, il sistema conta **33 utenze approvate**, con una presenza significativa degli enti operativi del territorio:

Organizzazione (estratto)	Ruoli assegnati
CFR — Corpo Forestale Regionale	municipality-manager, operator, simulator, viewer
Protezione Civile FVG	operator
Protezione Civile Duino-Aurisina	agency-manager, crew-lead, field, operator, …
PGD Breg (vigili del fuoco volontari SLO)	agency-viewer, operator, volunteer
GAL Carso – LAS Kras	agency-manager, municipality-manager, researcher, …
Corpo Pompieri Volontari Muggia	operator
Protezione Civile Ronchi dei Legionari	municipality-manager, operator
CMCC (ricerca)	municipality-manager, operator

Tabella 11 - Estratto delle organizzazioni e degli enti che hanno adottato la piattaforma con i relativi ruoli di sistema.

10.2 Registro operativo transfrontaliero

Il registro delle risorse operative dei due Paesi — base della pianificazione degli interventi — è popolato con:

Entità	N.
Sedi operative	**423**
Strutture operative	379
Squadre	**410**
Mezzi e attrezzature (censimento in corso)	19
Contatti operativi	48
Fonti dati	44
Segnalazioni qualità dati gestite	385

Tabella 12 - Entità e numeri censiti all'interno del registro operativo transfrontaliero.

Il workflow di audit della qualità dei dati (coordinate mancanti, specifiche dei mezzi, loghi) con 385 segnalazioni gestite testimonia un processo attivo di consolidamento del registro.

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

10.3 Utilizzo del portale pubblico

rilevazione anonima e senza cookie, da):

Indicatore	Valore
Visualizzazioni di pagina	**3.537**
Visitatori unici	**768**
Media giornaliera	118 visualizzazioni
Giorno di picco	19 luglio 2026 — 405 visualizzazioni

Tabella 13 - Statistiche di traffico e di utilizzo del portale pubblico riferite agli ultimi 30 giorni - dal 25 giugno al 25 luglio (rilevazione anonima e senza cookie).

Pagine più visitate: home (27,6%), **mappa del rischio (17,2%)**, guida (7,4%), statistiche (4,3%), storia degli incendi (3,8%), mappa 3D (3,2%). Il primato della mappa del rischio tra le pagine funzionali conferma il dato emerso dalla validazione con gli stakeholder, che l'avevano indicata come la funzione più utile (4,7/5).

10.4 Validazione con gli stakeholder (D.2.3.3)

La soluzione è stata verificata con gli operatori nei due workshop del deliverable D.2.3.3:

- **Aurisina, 17/3/2026** (34 presenze — vigili del fuoco, protezione civile, corpo forestale, Comunelle): il **71%** dei partecipanti ha giudicato la piattaforma "largamente coerente" con le zone critiche identificate; principale beneficio atteso l'individuazione preventiva delle aree a rischio (71%); principale criticità il coordinamento inter-istituzionale (53%) — organizzativa, non tecnologica.
- **Koper, 24/4/2026** (23 presenze — vigili del fuoco professionisti e volontari, URSZR): **7/7** operatori ritengono la piattaforma utile alla gestione degli incendi; esperienza d'uso 4,3 (navigazione), 4,1 (chiarezza), 3,9 (velocità); funzione più utile la **mappa del rischio (4,7/5)**.

Gli esiti hanno guidato la messa a punto in corso: ottimizzazione della velocità di risposta sugli archivi estesi, sviluppo dell'app mobile e potenziamento dell'interoperabilità con i sistemi in uso presso le istituzioni.

10.5 Dispiegamenti sul campo

- **Sensori "naso elettronico"**: installazione sperimentale nel Comune di Duino-Aurisina nell'estate 2026, pianificata con l'ottimizzatore di posizionamento (§6.2); rete attuale di 77 nodi registrati, 56 live.

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

- **Stazioni e qualità dell'aria**: stazioni AirQino SMART321/322/323 attive su Duino-Aurisina con dati pubblicati sul portale.
- **Termocamere e droni**: acquisizioni dei Comuni (termocamera con software di monitoraggio per Miren-Kostanjevica; drone con termocamera per ciascun Comune) censite nel registro asset di campo, con gestione del ciclo di manutenzione.

11 LINEE GUIDA E GOVERNANCE (da D1.2.2)

La soluzione tecnologica è accompagnata da **linee guida per l'allocazione ottimizzata delle risorse** e raccomandazioni di policy destinate a dipartimenti forestali, servizi antincendio e amministrazioni:

- **Prevenzione data-driven**: concentrare il 60–70% delle risorse di gestione dei combustibili nelle aree a vulnerabilità estremamente alta; priorità alle fasce entro 50 m da strade e ferrovie (67,4% delle ignizioni storiche) e alle pinete su versanti sud/sud-ovest.
- **Risposta a livelli** guidata dalle probabilità del modello (§7.3), con squadre posizionate in modo che le aree a probabilità >80% abbiano tempi di risposta sotto i 15 minuti.
- **Adozione graduale dell'IA**: percorso a fasi (parallelo → supporto decisionale → integrazione nelle procedure standard) con comitato tecnico congiunto, formazione a livelli e meccanismi di feedback dal campo.
- **Cooperazione transfrontaliera**: scambio dati in tempo reale, pool congiunto di risorse, esercitazioni annuali comuni, livelli di allerta standardizzati tra i due Paesi.
- **Conformità**: allineamento a EU AI Act e GDPR; supervisione umana come principio non negoziabile.

12 CONCLUSIONI E SVILUPPI

L'Output 2.1 consegna una soluzione **congiunta, operativa e già in uso**: la prima piattaforma transfrontaliera di prevenzione e allarme precoce per gli incendi del Carso, costruita su una base dati storica unificata, un indice di rischio calibrato localmente (K-FWI) che triplica la capacità di rilevamento rispetto all'approccio meteorologico generico, una rete di monitoraggio a terra in espansione e un sistema di allerta tracciabile end-to-end — il tutto reso accessibile al pubblico in quattro lingue.

I risultati preliminari della messa in opera — 33 enti con utenze attive, 423 sedi e 410 squadre nel registro operativo condiviso, 768 visitatori unici del portale in 30 giorni, validazione positiva degli stakeholder — indicano che la soluzione sta già transitando dalla fase di sviluppo a quella di adozione.

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

Sviluppi in corso verso la fine del progetto:

1. completamento dell'installazione dei nasi elettronici a Duino-Aurisina (estate 2026) e collegamento dei nodi alla pipeline di allerta;
2. ottimizzazione delle prestazioni sugli archivi storici estesi (priorità n.1 emersa dai workshop);
3. app mobile di campo e interoperabilità con i sistemi delle istituzioni di soccorso;
4. affinamento continuo dei modelli con i nuovi dati stagionali;
5. messa a regime della piattaforma sull'intero Carso nell'estate 2026 e definizione del modello di sostenibilità post-progetto.

RIFERIMENTI

1. Karst Firewall 5.0, **D1.2.1** — *Modelli di algoritmi predittivi*, Infordata Sistemi, 2025.
2. Karst Firewall 5.0, **D1.2.2** — *Allocazione ottimizzata delle risorse: linee guida e raccomandazioni politiche per l'utilizzo di modelli predittivi*, Infordata Sistemi.
3. Karst Firewall 5.0, **D2.1.1** — *Sistema Digitale di Gestione del Rischio Incendi*, Infordata Sistemi.
4. Karst Firewall 5.0, **D2.1.2** — *Dataset per la prevenzione degli incendi boschivi con dati storici dell'ecosistema carsico*, v6.0, Infordata Sistemi.
5. Karst Firewall 5.0, **D1.1.2** — *Valutazione del rischio e della vulnerabilità degli incendi boschivi in relazione ai cambiamenti climatici nella regione carsica*.
6. Karst Firewall 5.0, **D.2.3.3** — *Verifica e messa a punto della tecnologia digitale 5.0 con i principali stakeholder* (workshop Aurisina 17/3/2026 e Koper 24/4/2026).
7. Repository tecnico della piattaforma (`kf50-php`) e documentazione K-FWI (`kf50-kfwi-api`), Infordata Sistemi.
8. Portale pubblico: https://kf50.infordata.it/portal — Piattaforma operativa: `karst.way.to.it`.
9. Programma Interreg VI-A Italia-Slovenia, scheda progetto ITA-SI0600146 Karst Firewall 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