

Prodotto T2.2.2 “Rapporto sul potenziamento e sull’armonizzazione della modellistica a supporto della previsione degli incendi nei territori del Programma” e Investimento I3 “Potenziamento delle applicazioni modellistiche”

Produit T2.2.2 “Rapport sur l'amélioration et l'harmonisation de la modélisation pour supporter la prévision des incendies dans les territoires du Programme” et Investissement I3 "Amélioration des applications de modélisation"

**Progetto Interreg IT-FR
 MED-Star
 Strategie e misure per la mitigazione del rischio di incendio nell'area Mediterranea**

July 2022

**Projet Interreg IT-FR
 MED-Star
 Stratégies et mesures d'atténuation des risques d'incendie dans la région méditerranéenne**

Juillet 2022



Sommario

Amélioration de la chaîne de modélisation météorologique à haute résolution spatiale.	12
Méthodologie.	13
Nouveaux produits dérivés de la modélisation météorologique.	26
Le bulletin d'analyse météorologique de l'AIB.	26
Méthodologie.	27
Résultats et valeur ajoutée.	28
Modélisation de la probabilité et de l'intensité des incendies.	30
Méthodologie.	30
Résultats et valeur ajoutée.	32
Modélisation des dangers et des risques.	34
Cartographie de pointe des variables du combustible forestier par des enquêtes au sol et la télédétection.	34
Méthodes de cartographie du carburant.	35
L'application FuelGeoData - Application d'une méthodologie rapide pour la caractérisation des carburants.	36
Collecte de données sur les carburants.	41
Identification des points à relever.	41
La collecte des données.	42
Études préliminaires sur la cartographie des carburants et des risques.	43
Enquête sur les relations entre la quantité de combustible forestier, les types de végétation et la hauteur des peuplements dans les zones côtières du nord de la Toscane.	43
Caractérisation quantitative des combustibles forestiers à l'aide de techniques d'analyse géostatistique appliquées aux zones côtières de la Toscane.	44
Analyse comparative de différentes approches pour la production de cartes des risques d'incendie de forêt.	44
Cartes produites et méthodologies appliquées.	44
Carte de carburante.	44
Carte des risques selon le Manuel d'application du " Schéma du plan A.I.B. dans les parcs nationaux - 2018 ".	47
Mappe del rischio prodotta secondo la metodologia proposta in ambito del progetto.	48
Cartes finales développées.	50

Cartes saisonnières de susceptibilité aux feux de forêt.	55
Introduction à la méthodologie adoptée.	55
Données d'entrée.	56
Détails sur les types de végétation variables (veg).	57
Détail des données climatiques.	58
Détails de l'incendie	60
Cartes de susceptibilité.	61
Indicateurs de performance.	68
Analyse de la distribution de la susceptibilité.	70
Proposition de révision des zones de danger d'incendie de forêt.	75
Introduction.	75
Méthodologie adoptée.	75
Détermination de nouvelles zones.	77
Développement et validation du simulateur de propagation des feux de forêt sur le Web (WWS).	88
Structure du simulateur.	88
Validation du simulateur.	91
Développement et validation du simulateur PROPAGATOR.	97
Références bibliographiques.	100

Autori – Auteurs.

Arca Bachisio – Istituto per la BioEconomia (CNR)
Bottai Lorenzo ,– Consorzio LaMMA
Canu Annalisa,– Istituto per la BioEconomia (CNR)
Castiglia Carluccio – RAS, ARPA Sardegna
Casula Marcello – Istituto per la BioEconomia (CNR)
Chessa Michele – RAS, Protezione Civile Regionale
Cinus Salvatore – RAS, Protezione Civile Regionale
Cristofori Simone ,– Consorzio LaMMA
Cugusi Giacomo – RAS, Protezione Civile Regionale
Degli Esposti Silvia – Fondazione CIMA
Del Giudice Liliana – Istituto per la BioEconomia (CNR)
Delitala Alessandro Mario Sergio,– RAS, ARPA Sardegna
Dessy Carlo – RAS, ARPA Sardegna
Duce Pierpaolo – Istituto per la BioEconomia (CNR)
Ferrarese Ceruti Federico – RAS, Protezione Civile Regionale
Ficca Giovanni – RAS, ARPA Sardegna
Fiorucci Paolo – Fondazione CIMA
Foderi Cristiano – Università di Firenze
Frassinelli Nicolò – Università di Firenze
Jahdi Roghayeh – Istituto per la BioEconomia (CNR)
Marchi Enrico – Università di Firenze
Mari Riccardo ,– Consorzio LaMMA
Marra Elena – Università di Firenze
Meschi Giorgio – Fondazione CIMA
Neri Francesco – Università di Firenze
Paoloni Riccardo – Università di Firenze
Pecchi Matteo – Università di Firenze
Peddes Michele – RAS, Protezione Civile Regionale
Pedes Fabrizio – Istituto per la BioEconomia (CNR)
Pellizzaro Grazia – Istituto per la BioEconomia (CNR)
Perello Nicolò – Fondazione CIMA
Salbitano Fabio – Università di Firenze
Salis Michele – Istituto per la BioEconomia (CNR)
Scarpa Carla – Istituto per la BioEconomia (CNR)
Serra Silvia – RAS, Protezione Civile Regionale
Soi Fabrizia – RAS, Protezione Civile Regionale
Trucchia Andrea – Fondazione CIMA
Trudu Pier Luigi – RAS, ARPA Sardegna
Usai Antonio – RAS, Protezione Civile Regionale
Ventura Andrea – Istituto per la BioEconomia (CNR)

Introduzione – Introduction.

Il report T.2.2.2 "Rapporto sul potenziamento e sull'armonizzazione della modellistica a supporto della previsione degli incendi nei territori del Programma" descrive le attività di sviluppo della modellistica di previsione svolte nell'ambito della componente T2 del progetto MED-Star, attraverso investimenti in infrastrutture, attività di ricerca e trasferimento tecnologico, attività di campo. L'obiettivo principale è stato quello di sviluppare le attività modellistiche rispetto allo stato dell'arte di inizio progetto nei territori di programma, descritto nel report T.2.2.1.

Le attività di sviluppo modellistico hanno avuto le seguenti direttrici: modellistica meteorologica, modellistica a supporto dell'emissione dei bollettini di pericolosità, modellistica della suscettività e del rischio di incendio, modellistica della propagazione degli incendi.

La modellistica meteorologica ha rappresentato uno degli investimenti finanziari più rilevanti (svolto nell'ambito dell'Investimento I3) e ha portato all'acquisizione da parte di Regione Sardegna di un sistema avanzato di Supercalcolo, cioè un computer basato su più nodi di elaborazione e interconnessioni ad alte prestazioni. Questo investimento ha consentito lo sviluppo di una complessa attività tecnico-scientifica finalizzata al potenziamento della catena modellistica meteorologica ad alta risoluzione spaziale, in modo da costituire la base per lo sviluppo di nuovi prodotti per l'AIB (Anti Incendio boschivo) e per incrementare le

Le rapport T.2.2 " Rapport sur l'amélioration et l'harmonisation de la modélisation pour supporter la prévision des incendies dans les territoires du Programme" décrit les activités de développement de la modélisation de la prévision réalisées dans le cadre de la composante T2 du projet MED-Star, à travers des investissements dans les infrastructures, des activités de recherche et de transfert technologique, des activités de terrain. L'objectif principal était de développer les activités de modélisation par rapport à l'état de l'art au début du projet dans les domaines du programme, décrits dans le rapport T.2.2.1.

Les activités de développement de la modélisation ont suivi les lignes directrices suivantes : modélisation météorologique, modélisation pour soutenir l'émission de bulletins de danger, modélisation de la susceptibilité et du risque d'incendie, modélisation de la propagation des incendies.

La modélisation météorologique a représenté l'un des investissements financiers les plus importants (réalisé dans le cadre de l'investissement I3) et a conduit à l'acquisition par la région de Sardaigne d'un système de supercalcul avancé, basé sur des nœuds de traitement multiples et des interconnexions à haute performance. Cet investissement a permis le développement d'une activité technico-scientifique complexe visant à améliorer la chaîne de modélisation météorologique à haute résolution spatiale, de manière à constituer la base du développement de nouveaux produits pour l'AIB (Anti-Bushfire)

elaborazioni quotidiane. La catena modellistica interessa sia l'area delle Regioni del progetto strategico, al fine di fornire prodotti con prestazioni più adeguate alle esigenze di tutti i partner nella lotta agli incendi boschivi, sia un'area circostante la Sardegna per sperimentare da subito una catena operativa. Va notato che i vari run modellistici devono partire dalle diverse elaborazioni dei modelli meteorologici a scala globale (GCM - Global Circulation Model), disponibili a intervalli regolari durante ogni giorno; lo sviluppo ha dimostrato la fattibilità della catena modellistica a partire dai dati ECMWF-IFS, mentre per un'eventuale operatività sarà necessario stipulare accordi onerosi con gli enti nazionali preposti alla diffusione dei dati GCM. In accordo con i partner del progetto, è stata individuata una serie di casi di studio e per ognuno di essi sono state prodotte simulazioni dell'evoluzione meteorologica, trasferendole a Fondazione CIMA per la pubblicazione sulla piattaforma di condivisione dei dati transfrontalieri (Componente T1) e per inizializzare il modello RISICO. Le principali forzanti (temperatura, umidità relativa, vento, radiazione solare, precipitazioni) sono state calcolate a due e a dieci metri dal suolo; inoltre, nell'ottica di un'analisi che tenesse conto anche dell'instabilità termodinamica e delle possibili interazioni tra la dinamica atmosferica e quella degli incendi, sono state calcolate diverse grandezze in quota, l'energia potenziale disponibile per la convezione e l'indice di Haines. La pandemia di coronavirus (COVID19) e la conseguente carenza di componenti hardware, hanno determinato la piena disponibilità del sistema di Supercalcolo

et à augmenter le traitement quotidien. La chaîne de modélisation implique toutes les Régions du projet stratégique, afin de fournir des produits aux performances plus adéquates aux besoins de tous les partenaires dans la lutte contre les incendies de forêt, ainsi qu'une zone environnante de la Sardaigne pour tester immédiatement une chaîne opérationnelle. Il convient de noter que les différents cycles de modélisation doivent partir des diverses élaborations de modèles météorologiques à l'échelle mondiale (GCM - Global Circulation Model), qui sont disponibles à intervalles réguliers au cours de chaque journée ; le développement visait à démontrer la faisabilité de la chaîne de modélisation à partir des données du CEPMMT-IFS, tandis qu'une éventuelle opérationnalisation nécessitera des accords coûteux avec les organismes nationaux chargés de la diffusion des données GCM. En accord avec les partenaires du projet, une série d'études de cas a été identifiée et pour chacune d'entre elles, des simulations de l'évolution météorologique ont été produites et transférées à la Fondation CIMA pour être publiées sur la plateforme transfrontalière de partage de données (Composante T1) et pour initialiser le modèle RISICO. Les principaux facteurs de forçage (température, humidité relative, vent, rayonnement solaire, précipitations) ont été calculés à deux et dix mètres du sol. En outre, en vue d'une analyse qui tienne également compte de l'instabilité thermodynamique et des interactions possibles entre la dynamique atmosphérique et la dynamique du feu, plusieurs grandeurs ont été calculées en altitude, l'énergie potentielle disponible pour la convection et l'indice de Haines. La nouvelle modélisation météorologique est

solo in prossimità della chiusura del progetto; tuttavia, le attività di studio e sviluppo nel campo della modellistica meteorologica e del Supercalcolo hanno permesso, già nella campagna AIB 2022, di aumentare la frequenza dei run operativi giornalieri relativi al territorio della Sardegna e allo stesso tempo di ridurre i tempi di esecuzione. L'ampliamento del panorama delle informazioni fornite e il risparmio di tempo prezioso, grazie all'anticipazione della disponibilità degli output, hanno introdotto ovvie potenziali ripercussioni anche in tutte le attività di previsione del rischio incendio nella Regione Sardegna.

Attività di modellistica meteorologica funzionali all'ampliamento delle informazioni fornite tramite i bollettini di pericolosità di incendio sono state svolte anche dal Consorzio LaMMA, che ha sviluppato una serie di procedure e funzionalità grafiche per una migliore gestione della campagna AIB, ad esempio fornendo i valori di alcuni sub-codici dell'indice FWI, e di una loro forma di presentazione grafica idonea a evidenziare le differenze degli andamenti giornalieri e stagionali rispetto alla serie storica degli stessi valori, e la valutazione della severità delle condizioni degli indici. Le elaborazioni sono state effettuate su dati del modello Moloch a 2.5 km.

Partendo dai dati meteorologici, ma considerando anche le condizioni climatiche, geomorfologiche e vegetazionali, nonché gli aspetti tecnico-amministrativi, Regione Sardegna ha effettuato uno studio territoriale finalizzato alla ridefinizione delle aree di allerta utilizzate per la fornitura dei bollettini di pericolosità. Le modifiche sono state

très coûteuse en termes de calcul et a nécessité la conception spéciale d'un système de supercalcul avancé. Malgré la pandémie de coronavirus (COVID19) et la pénurie de composants matériels qui en a résulté, le système de supercalcul n'a été pleinement disponible que vers la fin du projet. Cependant, les activités d'étude et de développement dans le domaine de la modélisation météorologique et des supercalculateurs ont permis d'augmenter la fréquence des exécutions opérationnelles quotidiennes pour le territoire de la Sardaigne et en même temps de réduire leurs temps d'exécution. L'élargissement du panorama des informations fournies et le gain d'un temps précieux, grâce à la disponibilité anticipée des résultats, ont déjà introduit des répercussions potentielles évidentes dans toutes les activités de prévision des risques d'incendie également. Des activités de modélisation météorologique fonctionnelles à l'extension des informations fournies par les bulletins de risque d'incendie ont également été menées par le Consortium LaMMA, qui a développé une série de procédures et de fonctionnalités graphiques pour une meilleure gestion de la campagne AIB, par exemple en fournissant les valeurs de certains sous-codes de l'indice FWI, et leur forme de présentation graphique adaptée pour mettre en évidence les différences dans les tendances quotidiennes et saisonnières par rapport aux séries historiques des mêmes valeurs, et l'évaluation de la gravité des conditions de l'indice. Les calculs ont été effectués sur les données du modèle Moloch à 2,5 km.

En partant des données météorologiques, mais en considérant également les conditions climatiques, géomorphologiques

effettuate con l'obiettivo di potenziare l'efficacia del "Codice colore" dei bollettini di pericolosità, a vantaggio di tutto il sistema di protezione civile e della popolazione, soprattutto in relazione alle misure da porre in essere per la prevenzione degli incendi boschivi così da salvaguardare il patrimonio forestale e tutelare l'integrità della popolazione.

Il CNR-IBE ha sviluppato un'attività modellistica finalizzata all'applicazione dei modelli di simulazione probabilistici all'area di cooperazione Italia-Francia Marittimo, fornendo mappe della pericolosità e dell'esposizione agli incendi boschivi a risoluzioni elevate (100m) e in ultima analisi caratterizzare le variazioni spaziali della propagazione e del comportamento degli incendi. L'area studio presenta diversi patrimoni ecologici, culturali, antropici e turistici che, soprattutto durante la stagione estiva, sono fortemente minacciati dagli incendi boschivi. Pertanto lo studio rappresenta un'importante base di dati per l'impostazione delle attività di mitigazione e prevenzione degli incendi. La metodologia ed i risultati di questa vengono descritti in dettaglio nel prodotto T2.2.4., ovvero l'atlante della pericolosità degli incendi. La modellistica di propagazione è consistita anche nelle attività di sviluppo e test dei simulatori di propagazione sviluppati dai partner di progetto per finalità di prevenzione ma anche per un uso operativo in tempo reale. CNR-IBE ha sviluppato un simulatore di propagazione WWS. La Fondazione CIMA ha sviluppato PROPAGATOR, un modello di automa cellulare stocastico per la simulazione della propagazione degli incendi boschivi.

Entrambi i simulatori sono stati testati in diversi casi di studio forniti dalle Regioni,

et de végétation, ainsi que les aspects technico-administratifs, la Région Sardaigne a réalisé une étude territoriale visant à redéfinir les zones d'alerte utilisées pour fournir des bulletins de danger. Les modifications ont été apportées dans le but de renforcer l'efficacité du "code couleur" des bulletins de danger, au profit de l'ensemble du système de protection civile et de la population, notamment en ce qui concerne les mesures à mettre en place pour la prévention des incendies de forêt afin de sauvegarder le patrimoine forestier et de protéger l'intégrité de la population.

Le CNR-IBE a développé une activité de modélisation visant à appliquer des modèles de simulation probabilistes à la zone de coopération maritime Italie-France, en fournissant des cartes de danger et d'exposition aux feux de forêt à haute résolution (100m) et en caractérisant finalement les variations spatiales de la propagation et du comportement des feux. La zone d'étude possède plusieurs atouts écologiques, culturels, anthropiques et touristiques qui, surtout pendant la saison estivale, sont fortement menacés par les feux de forêt. Par conséquent, l'étude représente une base de données importante pour la mise en place d'activités d'atténuation et de prévention des incendies. La méthodologie et ses résultats sont décrits en détail dans le produit T2.2.4, l'Atlas des risques d'incendie. La modélisation de la propagation a également consisté à développer et à tester des simulateurs de propagation développés par les partenaires du projet à des fins de prévention mais aussi pour une utilisation opérationnelle en temps réel. CNR-IBE a développé le simulateur de propagation WWS. La Fondation CIMA a développé PROPAGATOR, un modèle

costituiti da incendi di rilevante interesse svoltisi in passato e hanno fornito una buona accuratezza generando un set di tematismi che consentono la caratterizzazione del comportamento delle fiamme.

Per quanto riguarda la modellistica di suscettività e del rischio di incendio si riportano le attività di sviluppo condotte da Fondazione CIMA, che ha analizzato la suscettività di incendi tramite algoritmi di Machine Learning per arrivare a una caratterizzazione territoriale della suscettività da incendio boschivo per la stagione estiva e invernale, sull'intera area di programma. E' stata inoltre valutata l'influenza delle diverse classi di vegetazione sulla suscettività.

L'Università di Firenze ha realizzato una mappatura del combustibile, condotta mediante un'applicazione appositamente sviluppata, finanziata nell'ambito dell'Investimento I3, che ha consentito la raccolta di un ampio set di dati sulle caratterizzazioni del combustibile vegetale delle province costiere della regione Toscana. Grazie ai dati raccolti è stata sviluppata una metodologia per la mappatura del combustibile e, successivamente, per la caratterizzazione della pericolosità e della gravità di incendio, con il fine ultimo di sviluppare una mappa del rischio di incendio. La metodologia sopperisce ai limiti di sviluppo della mappa di rischio secondo le indicazioni del manuale ministeriale, e alla scarsità di strati informativi reperibili con il dettaglio richiesto e per aree estese, come quelle provinciali o regionali. L'introduzione della carta del combustibile ha permesso di raggiungere un livello maggiore di accuratezza e precisione rispetto alla

d'automate cellulaire stochastique pour simuler la propagation des feux de forêt.

Les deux simulateurs ont été testés dans plusieurs études de cas fournies par les régions, consistant en des incendies d'intérêt pertinent qui se sont produits dans le passé, et ont fourni une bonne précision en générant un ensemble de thèmes qui permettent de caractériser le comportement du feu.

En ce qui concerne la modélisation de la susceptibilité et du risque d'incendie, nous rendons compte des activités de développement menées par la Fondation CIMA, qui a analysé la susceptibilité aux incendies au moyen d'algorithmes d'apprentissage automatique afin de parvenir à une caractérisation spatiale de la susceptibilité aux incendies de forêt pour les saisons d'été et d'hiver, sur l'ensemble de la zone du programme. L'influence des différentes classes de végétation sur la susceptibilité a également été évaluée.

L'université de Florence a réalisé une cartographie des combustibles à l'aide d'une application spécialement développée, financée dans le cadre de l'investissement I3, qui a permis de collecter un vaste ensemble de données sur la caractérisation des combustibles végétaux des provinces côtières de la région de Toscane. Grâce aux données recueillies, une méthodologie a été développée pour la cartographie du combustible et, par la suite, pour la caractérisation du danger et de la gravité des incendies, dans le but ultime de développer une carte des risques d'incendie. La méthodologie compense les limites de l'élaboration de la carte des risques selon le manuel ministériel, et la rareté des couches d'information disponibles avec le détail requis et pour de grandes zones, telles que

metodologia tradizionale che prevedeva l'impiego dell'uso del suolo. Infine, è importante sottolineare come la metodologia applicata può essere replicata anche nelle altre aree partner del progetto applicando le opportune modifiche.

A conclusione di questo sommario delle attività svolte si può sottolineare che gran parte delle attività di sviluppo modellistico hanno coinvolto tutti i territori di programma e quindi si ritiene che gli strumenti sviluppati possano essere adottati a scala transfrontaliera; inoltre, lo sviluppo comune di questi prodotti è un arricchimento per le regioni del programma, in termini di sviluppo tecnologico e tecnico-scientifico. Molte delle metodologie proposte, ad esempio la metodologia di mappatura della pericolosità e intensità di incendio, rappresentano una delle poche applicazioni in Europa a scala vasta e sicuramente possono essere considerate equivalenti allo stato dell'arte dei paesi avanzati, a livello mondiale, per le applicazioni di modellistica di propagazione con approccio probabilistico. I partner di progetto hanno inoltre dimostrato di capitalizzare tutte le precedenti esperienze di modellistica, sviluppate anche nei programmi del Programma Operativo Marittimo, e di avere tutte le competenze per aggiornare lo stato delle procedure e delle tecnologie in materia di previsione e prevenzione degli incendi. Il bacino di popolazione che può essere raggiunto da tali sviluppi metodologici e tecnologici, e quindi dai relativi impatti in termini di prevenzione e messa in sicurezza, è molto esteso e questo rappresenta uno dei principali impatti del progetto.

les zones provinciales ou régionales. L'introduction de la carte des carburants a permis d'atteindre un niveau d'exactitude et de précision supérieur à celui de la méthodologie traditionnelle utilisant l'utilisation des sols. Enfin, il est important de souligner que la méthodologie appliquée peut également être reproduite dans les autres zones partenaires du projet en appliquant les modifications appropriées.

Pour conclure ce résumé des activités réalisées, on peut souligner que la plupart des activités de développement de la modélisation ont impliqué tous les territoires du programme et, par conséquent, on pense que les outils développés peuvent être adoptés à une échelle transfrontalière ; en outre, le développement commun de ces produits est un enrichissement pour les régions du programme, en termes de développement technologique et technico-scientifique. Plusieurs des méthodologies proposées, par exemple la méthodologie de cartographie des risques d'incendie et de l'intensité, représentent l'une des rares applications en Europe à grande échelle et peuvent certainement être considérées comme équivalentes à l'état de l'art dans les pays avancés, au niveau mondial, pour les applications de modélisation de la propagation avec une approche probabiliste. Les partenaires du projet ont également montré qu'ils capitalisent toute l'expérience antérieure en matière de modélisation, également développée dans les programmes du programme opérationnel maritime, et qu'ils ont toutes les compétences pour mettre à jour l'état de l'art en matière de procédures et de technologies de prédiction et de prévention des incendies. La zone de chalandise qui peut être atteinte par ces développements méthodologiques

et technologiques, et donc par les impacts connexes en termes de prévention et de sécurité, est très large et cela représente l'un des principaux impacts du projet.

Amélioration de la chaîne de modélisation météorologique à haute résolution spatiale.

La Région de Sardaigne a développé une activité technico-scientifique complexe visant à améliorer la chaîne de modélisation météorologique à haute résolution spatiale, afin de pouvoir servir de base au développement de nouveaux produits pour l'AIB (Lutte Anti-Bosquito) et à l'augmentation du traitement quotidien.

La modélisation mise en œuvre couvre à la fois toute la zone stratégique du projet, afin de fournir des produits aux performances plus adaptées aux besoins de tous les partenaires de la lutte contre les incendies de forêt, et une partie de la Sardaigne afin de tester immédiatement la chaîne opérationnelle.

Il convient de noter que les différents cycles de modélisation doivent partir des différents traitements des modèles météorologiques à l'échelle mondiale (GCM - Global Circulation Model), disponibles à intervalles réguliers au cours de chaque journée ; le développement avait pour but de montrer la faisabilité de la chaîne de modélisation à partir des données du CEPMMT-IFS (Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme - Système intégré de prévision) dans son cycle 00Z, alors que pour une exploitation éventuelle, il sera nécessaire de conclure des accords onéreux avec les organismes nationaux chargés de la diffusion des données GCM.

En accord avec les partenaires du projet, un ensemble d'études de cas a été identifié et des simulations d'évolution météorologique ont été produites pour chacune d'entre elles, transférées à la Fondation CIMA pour être publiées sur la plateforme de partage de données transfrontalières (Composante T1), et pour initialiser le modèle RISICO (Fiorucci et al. 2008). Les principaux facteurs de forçage (température, humidité relative, vent, rayonnement solaire, précipitations) à deux et dix mètres du sol ont été calculés ; en outre, dans l'optique d'une analyse pouvant également tenir compte de l'instabilité thermodynamique et des interactions possibles entre la dynamique atmosphérique et la dynamique du feu, différentes grandeurs ont été calculées en altitude, l'énergie potentielle disponible pour la convection et l'indice de Haines (Haines 1998).

La nouvelle modélisation météorologique est très exigeante en termes de calcul et il a fallu concevoir un système de supercalcul avancé, basé sur des nœuds de traitement multiples et des interconnexions à haute performance, dont la réalisation ad hoc était l'objectif de l'investissement I3. La pandémie de coronavirus (COVID19) a entraîné des pénuries de composants matériels spécialisés et une augmentation d'environ 300 % de leurs coûts, ce qui a nécessité une nouvelle planification en cours, qui n'a abouti à la pleine disponibilité du système de supercalcul que vers la phase de clôture du projet.

Néanmoins, les activités d'étude et de développement dans les domaines de la modélisation météorologique et du Supercomputing ont permis d'augmenter la fréquence des passages opérationnels quotidiens relatifs au territoire de la Sardaigne et, en même temps, de réduire leur temps d'exécution. Le fait d'avoir élargi le panorama des informations de prévision et d'avoir gagné un temps précieux, grâce à la disponibilité plus rapide des résultats, a déjà introduit des retombées potentielles évidentes également dans l'ensemble des activités de prévision des risques d'incendie.

Méthodologie.

Les prévisions météorologiques sont basées sur des modèles physico-mathématiques complexes qui tentent de simuler l'évolution des différents paramètres physiques caractérisant l'atmosphère jusqu'à un nombre de jours donné. Les quantités physiques représentent les variables d'un système d'équations différentielles à résoudre dans le temps sur les trois composantes spatiales, en recourant nécessairement au calcul numérique en raison de l'absence de solutions analytiques. Résoudre les équations à une définition spatiale très élevée, afin de simuler une atmosphère de plus en plus réaliste, implique que le pas de temps d'intégration de ces équations soit également très petit ; malheureusement, il existe une limite à ces choix liée à la vitesse de calcul des ordinateurs disponibles.

À partir des différentes élaborations des modèles météorologiques européens et américains à l'échelle mondiale, respectivement ECMWF-IFS et NCEP-GFS, qui sont disponibles à intervalles réguliers au cours de chaque journée, des chaînes de modèles à aire limitée (LAM) sont exécutées. Chaque chaîne est constituée d'étapes séquentielles qui, partant de la prévision sur l'ensemble du globe des MCG et passant par des élaborations successives, notamment avec des pas de grille horizontale de plus en plus petits, permettent de concentrer la prévision numérique sur une zone d'intérêt spécifique. La complexité physico-mathématique de chaque chaîne réside également dans le "réglage fin" continu nécessaire pour la maintenir à la pointe de la technologie et l'optimiser pour le contexte opérationnel. Les modèles de zone limitée utilisés sont BoLAM, Moloch et WRF, avec des pas de grille horizontaux qui descendent d'environ 8 km à environ 1 km.

Après une phase de test pour mettre au point la nouvelle chaîne de modélisation, le modèle météorologique WRF a été implémenté dans une configuration à mémoire distribuée, c'est-à-dire en parallèle, avec une résolution explicite de la convection sans paramétrage ; il en a été de même pour les chaînes de modélisation BoLAM (avec paramétrage de la convection) et Moloch. Les programmes et bibliothèques nécessaires au pré et post-traitement ont également été configurés. Les compilateurs propriétaires d'Intel et les bibliothèques open source MPICH et OpenMPI ont été utilisés pour obtenir les meilleures performances.

Deux lignes de développement ont été poursuivies : la première sur la zone du projet pour des tests de prototypes et des études de cas utilisant la chaîne de modélisation WRF, la

seconde sur une zone sarde pour une utilisation opérationnelle avec plusieurs exécutions quotidiennes des chaînes BoLAM, Moloch et WRF. Les chaînes BoLAM et Moloch sont constituées de modèles développés à l'ISAC-CNR de Bologne depuis les années 1990, tandis que la chaîne WRF est basée sur le modèle non-hydrostatique développé par la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) et le NCEP (National Centre for Environmental Prediction).

Le modèle météorologique WRF, ici en version 4.3.3, se compose de deux noyaux dynamiques, dont l'ARW (Advanced Research WRF) est celui qui est mis en œuvre. Le modèle WRF fait preuve d'une grande ductilité pour des champs d'application allant des simulations locales à la méso-échelle. Les chaînes WRF-ARW se diversifient également en fonction du GCM des données initiales (ECMWF-IFS HRES ou NCEP-GFS).

Parmi les différentes configurations et implémentations adoptées comme améliorations de la configuration WRF pré-projet (décrite dans le livrable T.2.2.1) à utiliser pour la zone MED-Star, on peut citer les suivantes

mise à jour des données statiques : transformation dans un format lisible par le WRF
prétraitement des données orographiques GMTED2010 de 15" (environ 500 mètres), en optant pour l'élévation médiane au lieu de l'élévation moyenne, et la variance sous-grille correspondante

Cartes de résolution 30" fournies par l'Université normale de Pékin pour les informations sur les types de sol ;

des changements dans la procédure d'ingestion de la température de surface de la mer, avec un nouveau masque terre-mer et une nouvelle interpolation ;

schéma microphysique : WSM6 (WRF Single-moment 6 class) avec six classes d'hydrométéores calculées ;

options pour le vent topographique, le rayonnement de la pente et l'ombrage topographique ;

initialisation avec le run opérationnel ECMWF-IFS HRES à 0.1° ; les conditions aux limites sont acquises toutes les heures pour les 48 heures suivantes ;

Le traitement utilise une imbrication bidirectionnelle pour porter le pas de grille horizontal sur la zone d'intérêt à 1,5 km avec 50 niveaux verticaux.

En revanche, dans la zone de la Sardaigne, en raison des différentes configurations et implémentations adoptées comme améliorations de la configuration WRF pré-projet (décrite dans le livrable T.2.2.1), nous avons été plus prudents à la fois dans l'implémentation de nouvelles données, qu'elles soient statiques ou non, et de nouveaux schémas, afin d'évaluer leur performance réelle sur une plus longue période de temps et donc avec un historique de cas plus étendu. Il convient également de souligner que dans les opérations, comme c'est le cas dans la zone de la Sardaigne, il est également nécessaire de respecter les contraintes temporelles strictes imposées par les activités de protection civile.

Les chaînes sont basées sur les données de 18Z et 00Z (EC18Z et EC00Z respectivement) et sont greffées sur les niveaux de pression à partir de la prévision de +00h avec les conditions au bord triorhique ; la simulation est réalisée par imbrication bidirectionnelle à deux échelles spatiales, à 5,4 km et 1,8 km et verticalement sur 45 niveaux. Dans la zone de

la Sardaigne et des mers environnantes, le pas spatial horizontal est de 1,8 km. La dernière échelle de temps traitée est de +54h pour le run 18Z et de +48h pour le run 00Z.

Afin de tirer parti des différences inhérentes entre les sources de MCG, bien que la principale reste le CEPMMT, une nouvelle chaîne WRF a également été mise en œuvre dans la région de la Sardaigne, initialisée avec les données globales NCEP-GFS ; cette chaîne est exécutée quatre fois par jour (exécutions de 00Z, 06Z, 12Z, 18Z). Les données NCEP-GFS ont un pas spatial horizontal de 0,25° avec des conditions de bord horaires. La simulation est similaire à celle mise en œuvre avec les données du CEPMMT, mais l'imbrication bidirectionnelle est de 9 km et 3 km. L'intervalle de traitement est de +72h pour chaque exécution ; le pas spatial horizontal pour la zone de la Sardaigne et les mers environnantes est d'environ 3 km.

Le BoLAM est un modèle hydrostatique à aire limitée qui intègre les équations primitives, avec paramétrage de la convection atmosphérique, tandis que le Moloch est un modèle qui fournit des prévisions spatialement détaillées avec une représentation explicite des phénomènes convectifs et qui intègre les équations d'une atmosphère non hydrostatique et compressible. Les chaînes BoLAM et Moloch s'appuient exclusivement sur les données HRES du CEPMMT-IFS à 0,125° sur les niveaux verticaux hybrides.

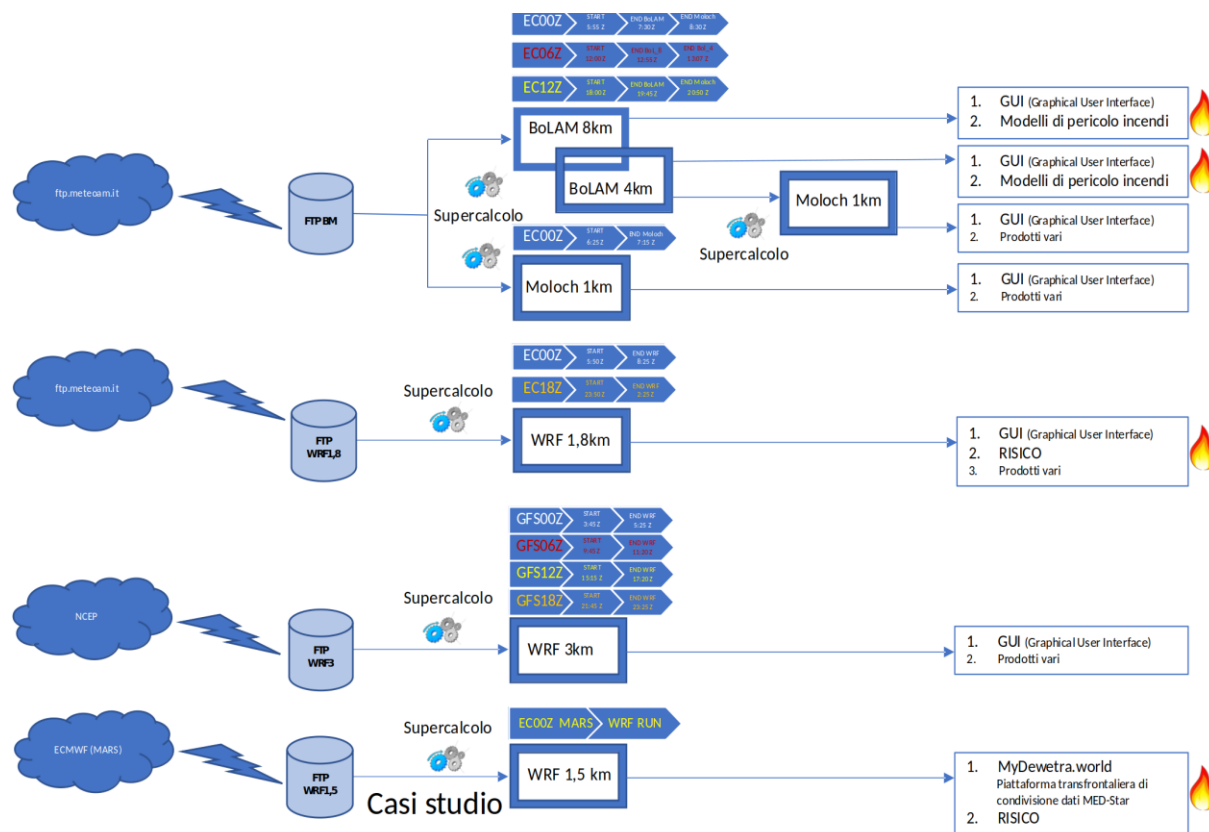
La prévision +06h du run EC00Z est introduite pour BoLAM sur la zone Euro-Atlantique dans la version B08L48 (pas de grille horizontal d'environ 8 km et 48 niveaux verticaux). Les prévisions qu'il fournit portent sur 66 heures à partir de 06Z le jour même. Le deuxième modèle de la chaîne, directement interfacé avec la prévision +03h du run précédent B08L48, est le BoLAM sur la zone méditerranéenne dans la version B04L56 (environ 4 km de pas de grille horizontal et 56 niveaux verticaux). Les prévisions qu'il fournit portent sur 45 heures à partir de 09Z le jour même. Le troisième modèle de la chaîne, directement interfacé avec la prévision +03h du run précédent B04L56, est le Moloch sur la zone de la Sardaigne et les mers environnantes dans la version M01L60 (environ 1 km de grille horizontale et 60 niveaux verticaux). La prévision qu'il fournit est de 42 heures à partir de 12Z de la journée en cours.

Des élaborations similaires ont également eu lieu pour les runs EC12Z : la prévision initiale est de +12h et la dernière échéance élaborée pour BoLAM-8km est de +72h, +48h pour BoLAM-4km, +45h pour Moloch ; pour le run EC06Z : la prévision initiale est de +06h et les dernières échéances élaborées sont respectivement de +36h pour BoLAM-8km et +33h pour BoLAM-4km, visant l'activité de Suivi et Surveillance définie par la Directive PCM du 27.02.2004. Les sorties sont horaires.

Un autre traitement Moloch est disponible vers 7:15Z. Il diffère des chaînes du même nom en ce qu'il est directement branché sur le run 00Z du ECMWF-IFS HRES en s'interfaçant avec la prévision +06h. La prévision qu'il fournit est de 48 heures à partir de 06Z du jour

courant sur la zone de la Sardaigne et les mers environnantes avec un pas spatial horizontal d'environ 1 km et 60 niveaux verticaux.

La figure 1 illustre de manière schématique le déroulement des chaînes de modélisation ; on y voit les heures (Z, c'est-à-dire GMT) indicatives du début et de la fin de chaque processus qui, de manière cyclique, se répète chaque jour avec les différentes données initiales et aux bords, comme l'indiquent les différentes couleurs des flèches temporelles ; enfin, le flux de traitement pour les études de cas est indiqué.



MED-Star - Catene modellistiche meteorologiche aggiornate
Figura 1: Processus de modélisation des flux.

Il était nécessaire de concevoir un système de supercalcul avancé, basé sur de multiples nœuds de traitement et interconnexions à haute performance, dont la réalisation ad hoc était le but de l'investissement I3.

Le système dit de supercalcul, un outil constitué d'un cluster Linux de type Beowulf Class II (Cluster Tirso) tel que schématisé ci-dessous, a été conçu et rendu opérationnel pour garantir la puissance de calcul et l'espace de stockage nécessaires. La configuration logicielle comprend un outil open source, distribué et évolutif pour la surveillance du cluster (Ganglia), un outil de gestion et d'ordonnancement avancé (SGE - Sun Grid Engine), également open source, ainsi qu'un environnement de virtualisation (libvirt) et quelques bibliothèques MPI pour le calcul distribué ; les compilateurs Fortran et C++ d'Intel et PGI sont propriétaires. Les principales infrastructures sont un centre de données, équipé d'un système de climatisation et d'une alimentation électrique ininterrompue via un générateur, ainsi que des connexions stables et redondantes au réseau en fibre optique, avec un débit suffisant pour garantir la fourniture de l'élément vital des données du MCG.

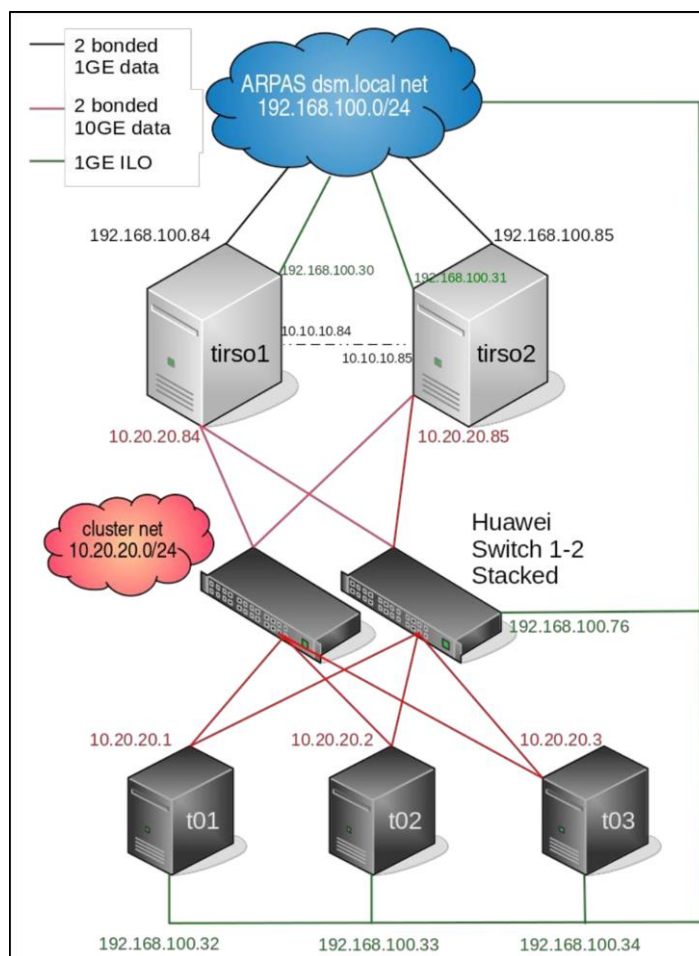


Figura 1: Système de calcul intensif à diagramme simplifié (Tirso Cluster).

Le Tirso Cluster, acheté en plusieurs lots à partir de 2019, en tant que produit MED-Star pour l'amélioration de la modélisation météorologique, bénéficie d'une extension de garantie de 24 mois, portant la période de couverture à cinq ans. La représentation de la figure 2 montre les éléments essentiels requis pour la chaîne de modélisation opérationnelle actuelle ; quatre autres nœuds de calcul (t04, t05, t06, t07) sont ensuite installés et configurés dans le même réseau pour l'activité de développement et pour compenser les éventuelles criticités. L'acquisition d'un commutateur InfiniBand permet de disposer d'une interconnexion performante (faible latence et large bande passante) et donc de pouvoir distribuer les traitements non seulement sur plusieurs cœurs d'un même nœud de calcul, mais aussi sur plusieurs nœuds.

Les nœuds frontaux, tirso1 et tirso2, sont configurés en HA (High Availability), garantissant ainsi le démarrage des services sur le nœud maître et assurant simultanément que le nœud de secours est prêt à prendre possession des ressources en cas de panne du nœud maître. Ils sont joignables sous le nom virtuel tirso et présentent les principales caractéristiques suivantes :

Server 4U HPE

- Linux CentOS 7.6
- 4 CPU 12 core intel Xeon Gold 5518M
2.30Ghz
- 768 GB RAM
- 2 hard disk 300GB SAS RAID1
- 24 hard disk 1.8TB SAS RAID 6
- 4 Schede rete Gigabit Ethernet
- 6 Schede rete 10 Gigabit Ethernet
- Scheda InfiniBand
- Interfaccia di management "ilo"
- Alimentatori ridondati



Les sept nœuds de calcul ont les spécifications principales suivantes :

Server 2U HPE

- Linux CentOS 7.6
- 4 CPU 18 core Intel Xeon Gold 6140M
2.30GHz
- 768 GB RAM
- 2 hard disk 300GB SAS RAID1
- 6 Schede rete Gigabit Ethernet
- 6 Schede rete 10 Gigabit Ethernet
- Scheda InfiniBand
- Interfaccia di management "ilo"
- Alimentatori ridondati



L'espace restant actuellement disponible pour le stockage est d'environ 7 To ; le /home sur tirso est partagé par tous les nœuds de calcul.

Résultats et valeur ajoutée.

Au cours du projet, les partenaires ont convenu d'identifier une série de jours où les incendies les plus importants en termes de quantité ou de surface se sont produits au cours des dernières années dans la zone commune ; ceci a été fait afin de simuler avec une grande précision spatiale les scénarios météorologiques sur l'ensemble de la zone du projet pour les 48 heures suivant le jour identifié et de fournir des prévisions par tranches horaires. L'ensemble d'intérêt commun identifié se compose d'environ 60 jours de l'été 2017 ; afin de recréer les conditions typiques d'une phase de prévision opérationnelle dans laquelle l'analyse GCM disponible est le run 00Z du modèle déterministe HRES du CEPMMT-IFS (0,1°), les données nécessaires pour chaque étude de cas ont été acquises à partir des archives MARS du Centre européen, en utilisant la coûteuse convention avec Difesa Servizi S.p.A. déjà en place avec ARPAS en tant que service officiel. La collecte susmentionnée est tombée au moment de la transition du centre de calcul du CEPMMT de son emplacement historique à Reading (Royaume-Uni) vers le nouveau à Bologne (Italie), ce qui a entraîné une période relativement longue en raison de nombreuses interruptions de service planifiées et de connexions instables. Chaque partenaire a également mis à disposition les mesures horaires des principales quantités physiques enregistrées dans les stations représentatives de la zone couverte par chaque incendie, afin d'accéder via la plateforme transfrontalière de partage de données (composante T1, myDewetra) aux couches d'information nécessaires à l'analyse des études de cas.

Les simulations de l'évolution météorologique pour chaque étude de cas ont été traitées avec le modèle WRF sur le système de Supercomputing, puis transférées à la Fondation CIMA pour être publiées sur la plateforme transfrontalière, afin que chaque partenaire puisse

effectuer ses propres évaluations, et pour initialiser le modèle RISICO. La figure 3 montre un exemple de prédiction de champ de température de deux mètres pour une étude de cas, qui montre également l'étendue de la zone commune considérée pour toutes les simulations, et la figure 4 montre un exemple de champ de vitesse de propagation du front de feu prédit par RISICO. Pour toutes les études de cas, les principaux facteurs de forçage (température, humidité relative, vent, rayonnement solaire, précipitations) ont été calculés à deux et dix mètres au-dessus du sol ; en outre, en vue d'une analyse qui pourrait également examiner l'instabilité thermodynamique et les interactions possibles entre la dynamique atmosphérique et la dynamique du feu, l'énergie potentielle disponible pour la convection, l'indice de Haines (un exemple dans la figure 5) et diverses quantités en altitude (température, température potentielle, humidité relative et spécifique, vent, vitesse verticale, vorticité) ont également été prédites pour plusieurs cas.

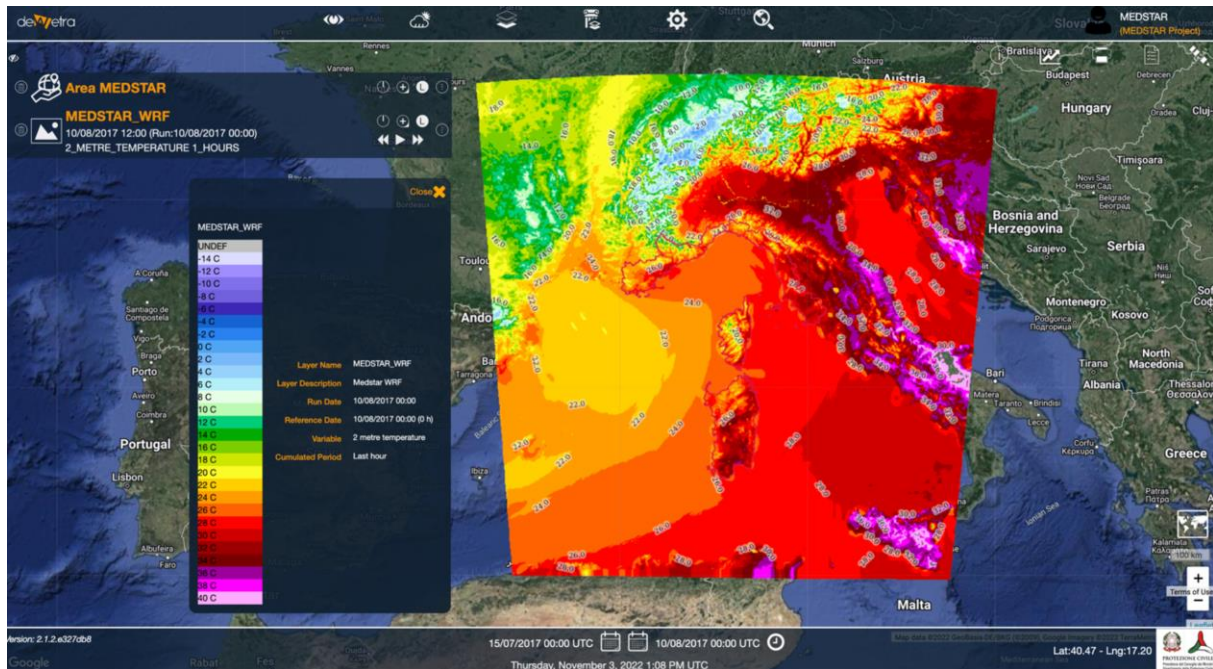


Figura 2: Exemple de prédiction de champ de température de deux mètres pour une étude de cas de zone MED-Star.

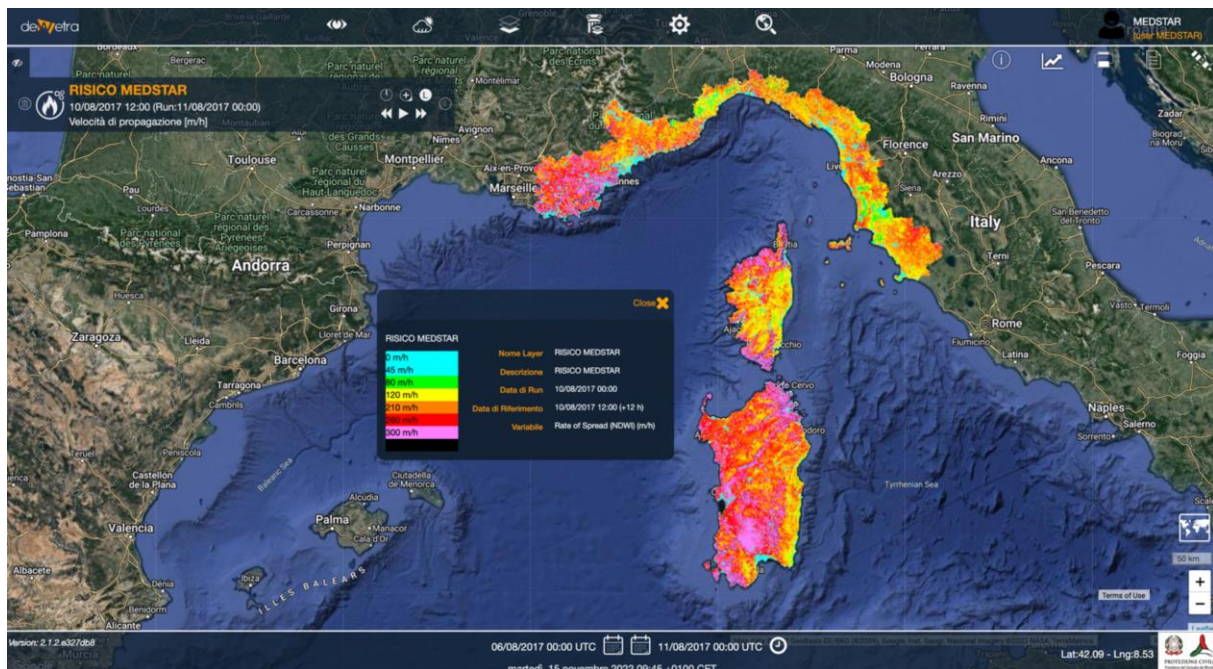


Figura 3: Exemple d'un champ de vitesse de propagation du front de feu alimenté par le WRF pour une étude de cas de zone MED-Star.

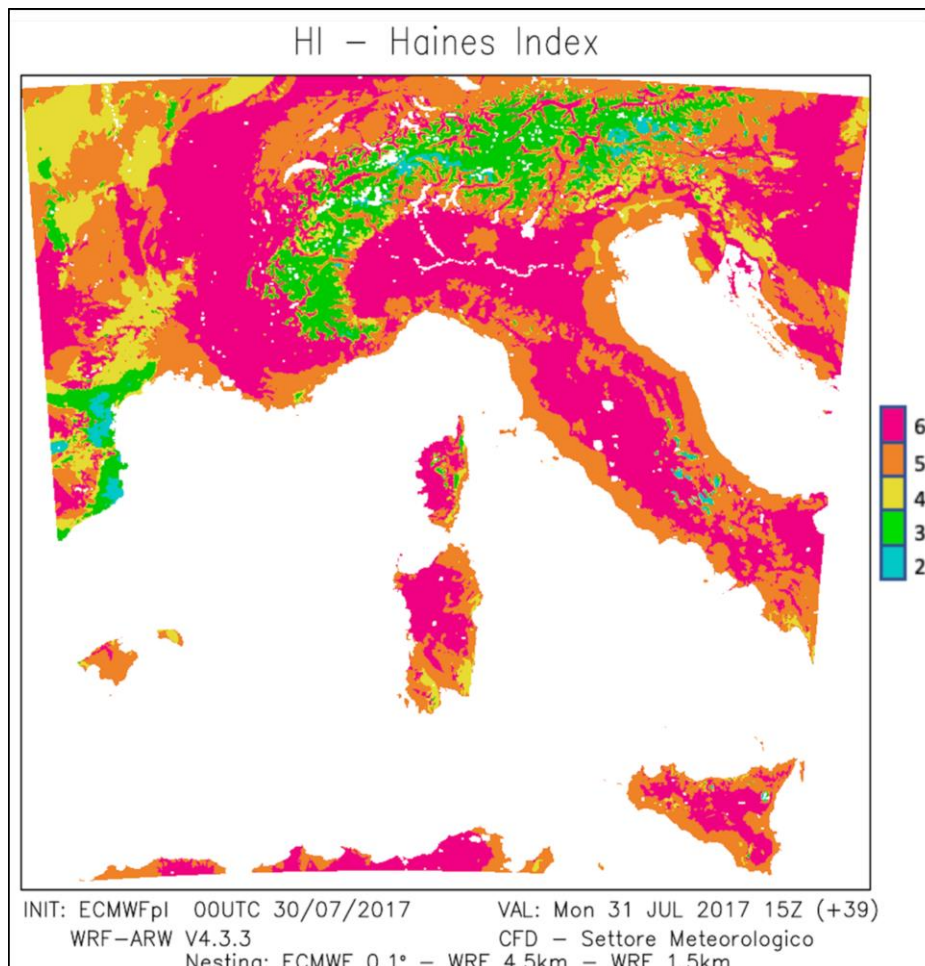


Figura 1* ARABIC5: Exemple de prédiction de l'indice de Haines pour une étude de cas MEDStar.

En ce qui concerne le territoire de la Sardaigne, trois cas extrêmes ont été analysés en particulier, dans lesquels la surface couverte par le feu était supérieure à 1000 hectares, et dans un souci de synthèse, un indice expérimental de danger de feu à caractère potentiellement extrême, l'EFMI - Extreme wildfire Meteorological Index (Dessy et al. 2022), a également été introduit. Il s'agit de situations dans lesquelles, vraisemblablement, les difficultés d'extinction de l'incendie proviennent d'un comportement anormal, explosif et erratique, comme le signalent parfois les équipes d'intervention, qui peut également résulter de l'action synergique de conditions météorologiques défavorables (canicule, vent) et de l'interaction de la dynamique du feu avec l'atmosphère environnante. L'analyse a donc pris en compte à la fois les conditions classiques comparables avec des instruments placés à faible distance du sol (2 m ou 10 m), et le profil vertical de l'atmosphère afin d'examiner

également les éventuelles conditions d'instabilité convective propices au développement d'incendies importants et graves.

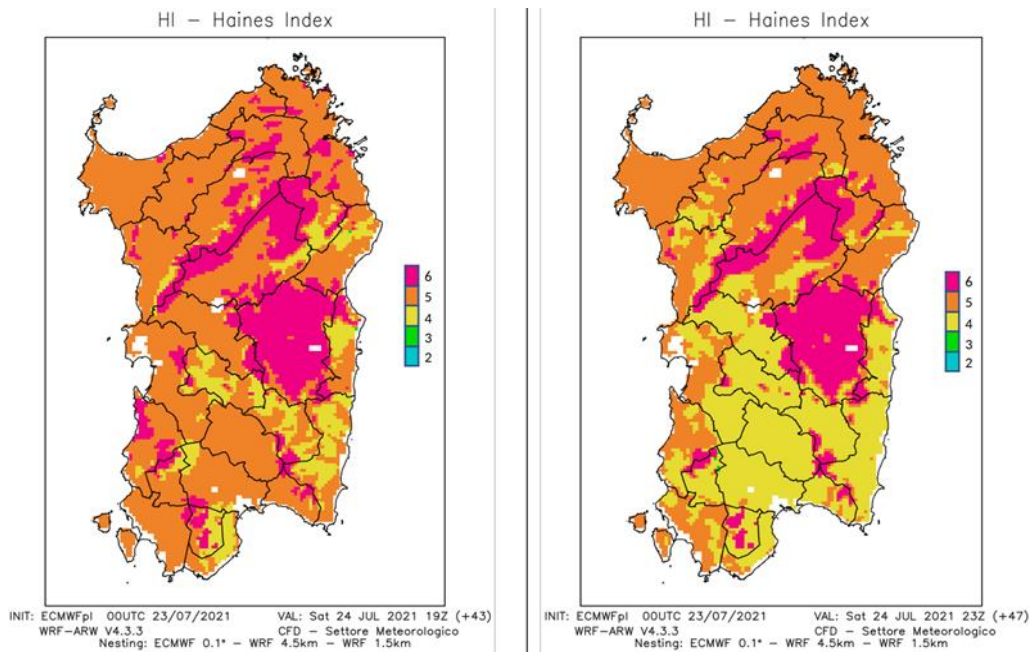


Figura 6: Exemples de prévision sur le territoire de la Sardaigne de quelques quantités et indices pour des études de cas sur la zone MED-Star.

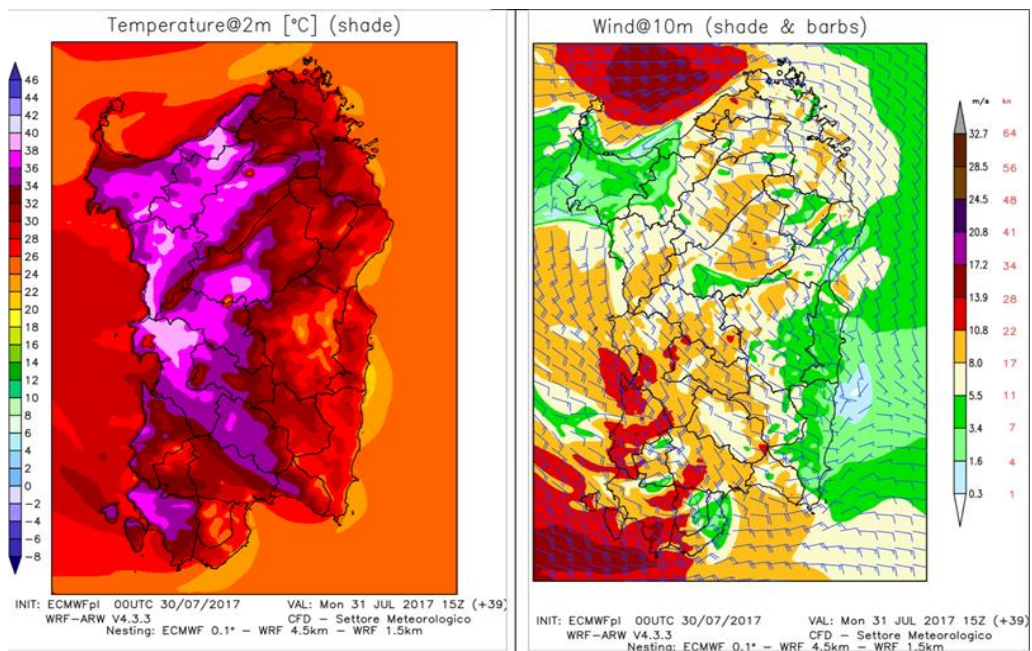


Figura 7: Exemples de prévision sur le territoire de la Sardaigne de quelques quantités et indices pour des études de cas sur la zone MED-Star.

- L'analyse se concentre exclusivement sur le forçage météorologique favorable à la propagation maximale d'un éventuel incendie ; comme on peut le voir sur les figures 6 et 7, on a représenté graphiquement quelques champs de magnitudes corrélés au développement d'incendies à caractère potentiellement extrême (dépendant de la température, de l'humidité et du vent dans les basses couches) : chaque paire d'images se réfère à l'incendie qui a touché Montiferru en 2021 et Gonnosfanadiga en 2017, respectivement. La stabilité atmosphérique déduite de la modélisation numérique a été comparée de manière critique dans l'analyse avec l'indice classique de Haines, bien que ses limites soient connues (Potter 2018), et avec l'indice de danger expérimental EFMI - Extreme wildFire Meteorological Index - mentionné plus haut.
- Les cas examinés ne constituent qu'une première étape dans la vérification de la chaîne de prédiction complexe, car des conclusions solides nécessitent évidemment des statistiques relativement longues ; l'analyse de ces événements individuels de feux de forêt en Sardaigne suggère que la nouvelle modélisation météorologique permet de mieux prévoir les scénarios de danger potentiels que les séries opérationnelles utilisées jusqu'à présent.
- Afin de tester les procédures nécessaires pour une chaîne opérationnelle consistant à coupler la modélisation météorologique et la modélisation du danger d'incendie, en collaboration avec la Fondation CIMA, l'interface entre le WRF, sur la zone de la Sardaigne, et RISICO a été mise en place ; pendant la campagne AIB actuelle en Sardaigne, à partir d'août 2022, les runs RISICO à l'échelle régionale initialisés avec le modèle météorologique WRF sur la zone de la Sardaigne sont ainsi calculés et mis quotidiennement à la disposition de la Protection Civile. Cette configuration serait adaptable à l'ensemble de la zone du projet, compte tenu des contraintes mentionnées ci-dessus.
- En outre, lors des opérations associées aux campagnes AIB de la période 2019-2022, un indice expérimental de danger d'incendie basé exclusivement sur des grandeurs météorologiques (IMI - Indice Meteo Incendi ; introduit par Ficca et utilisé à titre expérimental par la Protection civile régionale en application du Plan régional de prévision, de prévention et de lutte active contre les incendies de forêt 2014-2016 - révision 2014, approuvé par la DGR n° 18/17 du 20 mai 2014) a continué à être dérivé de la chaîne météorologique BoLAM. La protection civile régionale de Sardaigne a initialisé tous ses modèles de danger d'incendie avec les prévisions quotidiennes de la chaîne météorologique BoLAM.
- En résumé, on peut conclure que les activités d'étude et de développement dans les domaines de la modélisation météorologique et du Supercomputing, par rapport à la situation ex ante (livrable T.2.2.1), ont permis de

- construire un prototype de chaîne de modélisation (WRF) sur la zone MED-Star réalisée sur des études de cas ;
- mettre en œuvre une procédure opérationnelle pour interfacer un modèle météorologique (WRF) et un modèle de risque d'incendie (RISICO) dans une configuration évolutive pour l'ensemble de la zone du projet.
- réaliser un système de supercalcul adapté pour supporter la charge de calcul et l'archivage annexe des simulations ;
- mettre à jour les chaînes de modélisation météorologique opérant sur la Sardaigne (BoLAM, Moloch, WRF), en diversifiant les sources de MCG et en augmentant la fréquence d'émission.

Nouveaux produits dérivés de la modélisation météorologique.

Le Secteur AIB de la Région Toscane, en collaboration avec le Consortium LaMMA et l'Institut de Bioéconomie du CNR (IBE), prépare depuis des années la mise en œuvre d'un système de prévision des conditions de susceptibilité à l'allumage et à la propagation des incendies de forêt, qui utilise l'indice canadien pour déterminer le niveau de danger quotidien d'incendie sur le territoire toscan, sur la base des observations et des prévisions météorologiques. Une partie des prévisions traitées est rendue publique sur les pages du site du Consortium LaMMA - Bulletin des risques d'incendie, tandis que le secteur AIB de la Région Toscane bénéficie de services supplémentaires à accès restreint, dont le Bulletin d'analyse météorologique AIB. Grâce au travail et à l'analyse approfondie de l'année dernière, ce bulletin s'est enrichi de nouvelles cartes et de nouvelles fonctions :

Carte du percentile du code de la sécheresse

Outil pour visualiser les tendances du code de la sécheresse au niveau municipal

Le bulletin d'analyse météorologique de l'AIB.

L'un des outils utilisés pendant les périodes à risque (juillet-août-septembre) est le bulletin d'analyse météorologique de l'AIB, dans lequel sont analysés les principaux indices et paramètres météorologiques (figure 8). Grâce à cette analyse, l'analyste AIB de la Région Toscane fournit des indications opérationnelles sur les feux attendus, le comportement du feu et des considérations sur les zones régionales à alerter.

En présence de conditions de risque très élevé (indice FWI rouge) dans une ou plusieurs zones territoriales de la Toscane, le Secteur AIB, avant 12h00, envoie par e-mail le bulletin d'analyse météorologique de l'AIB aux analystes de l'AIB, aux directeurs des opérations de lutte contre les incendies, au SOUP et aux COP de l'AIB.

En plus des cartes, le bulletin est également accompagné de deux parties textuelles descriptives :

Ce que nous avons eu :

où des informations sont données sur le nombre, la répartition territoriale et les caractéristiques des incendies de forêt qui se sont produits en Toscane la veille ;

Ce que nous attendons :

contient une analyse précise des conditions météorologiques prévues pour la journée, divisée en tranches horaires. Une attention particulière est accordée aux caractéristiques du vent, à l'humidité relative de l'air et aux conditions atmosphériques en termes de stabilité/instabilité, ainsi qu'au type et à l'intensité des incendies attendus, en plus des indications opérationnelles considérées comme particulièrement utiles en fonction des conditions météorologiques actuelles et prévues.

Il est également possible d'insérer dynamiquement des photos et le type d'incendie attendu.

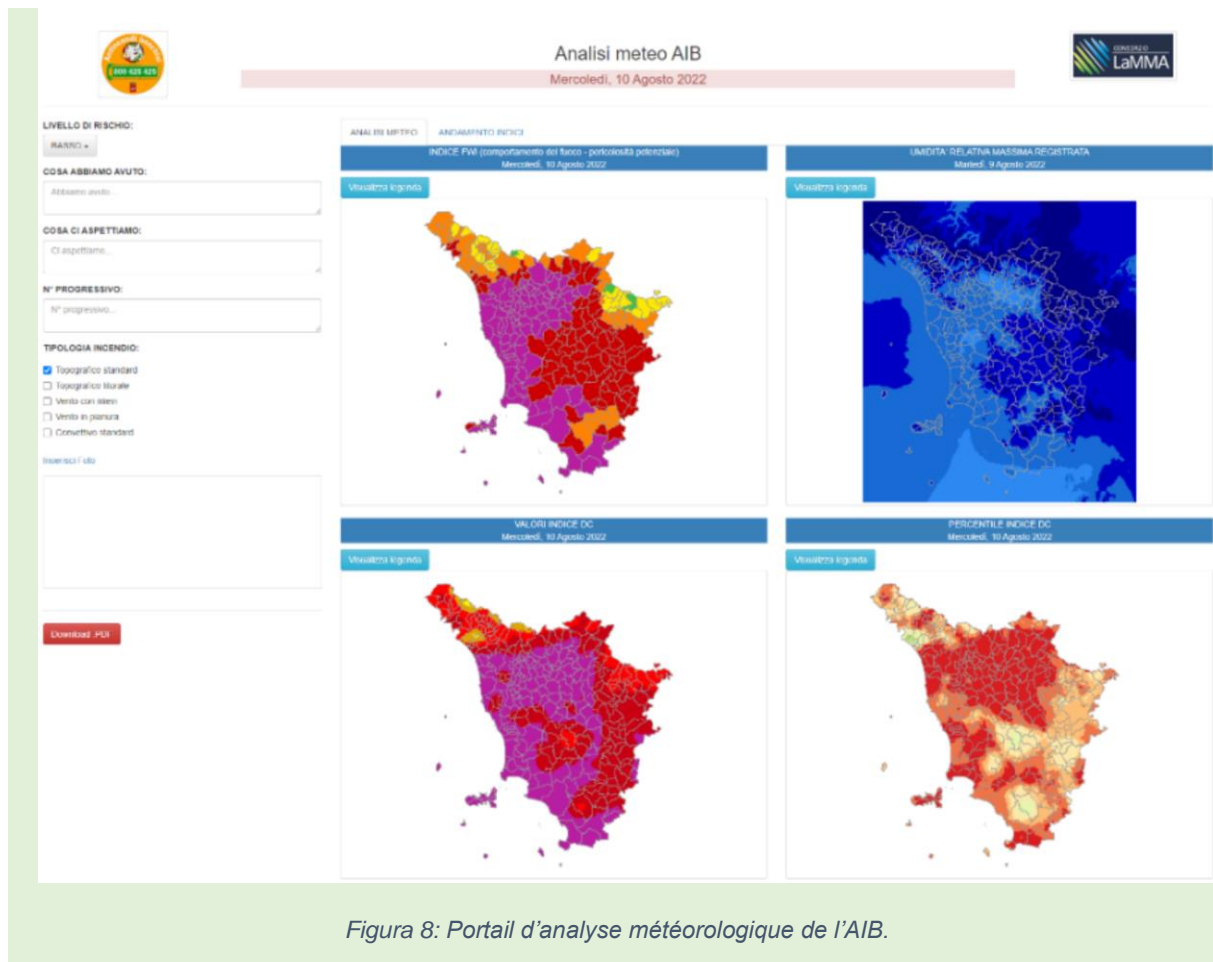


Figura 8: Portail d'analyse météorologique de l'AIB.

Méthodologie.

La création des nouvelles cartes de percentiles a été rendue possible grâce à la disponibilité, pour le territoire toscan, d'une archive de données météorologiques observées par des stations météorologiques datant de 1991 à aujourd'hui. Chaque jour, en plus de la création des différents indices quotidiens de danger de feu, une archive des cartes de percentile du Code de la sécheresse est également créée. Pour ces cartes, qui ont une résolution spatiale de 1km x 1km, une statistique zonale par zone municipale est également calculée. Cette statistique est stockée dans une base de données relationnelle, dans notre cas en utilisant le dbms PostgreSQL, pour une analyse ultérieure, et nous a permis de créer le nouvel outil de visualisation des tendances du Code de la sécheresse. La partie interaction dynamique de l'outil a nécessité l'utilisation du langage Python pour la partie traitement et analyse des données du côté backend, tandis que des bibliothèques javascript ont été utilisées pour la partie frontend, comme leaflet, pour l'interaction avec la carte des communes, et plotly pour la génération des graphiques.

Résultats et valeur ajoutée.

Le code de sécheresse est un excellent indicateur des incendies d'été car il évalue la teneur moyenne en humidité des couches organiques de la litière forestière la plus profonde et des combustibles les plus importants. Ce type de combustible s'assèche lentement pendant l'été et la période de sécheresse, de sorte que la surveillance de sa teneur en eau (TE) est un indicateur essentiel pour estimer le risque d'inflammation du feu. Comme il est également moins sensible aux changements des conditions météorologiques quotidiennes (il a une plus grande inertie), il est utilisé par les analystes pour les prévisions à long terme.

La figure 9 montre la carte DC comparée à la carte des percentiles DC pour la journée actuelle (années climatologiques 1991 - 2021).

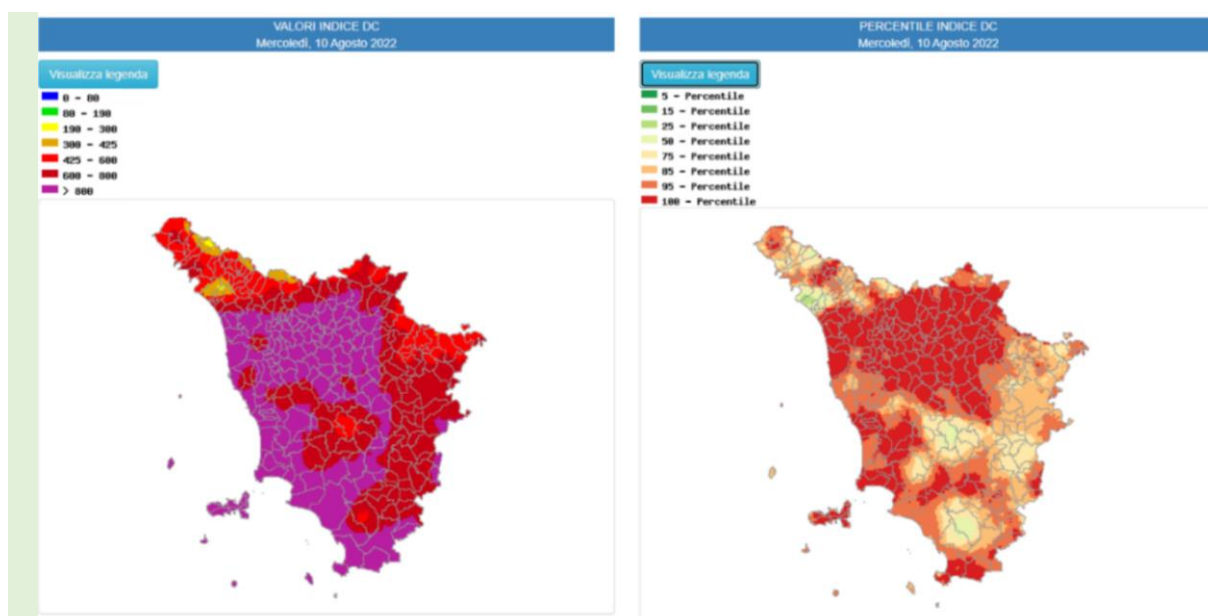
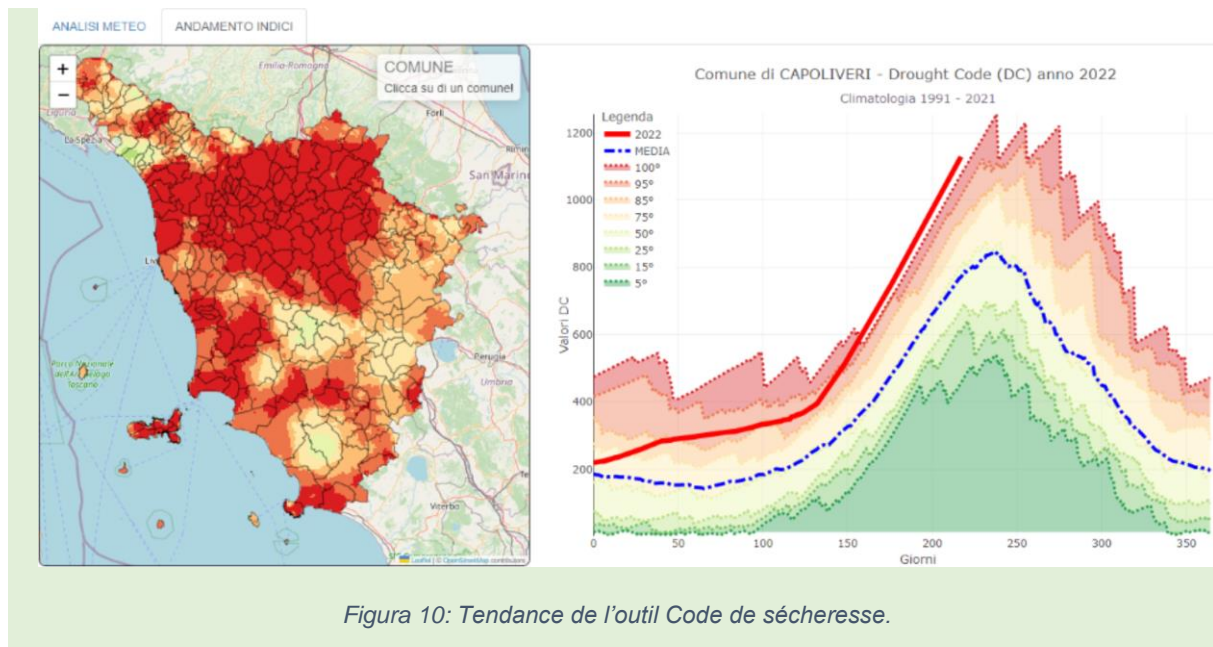


Figura 9: Code de sécheresse centile.

La figure 10 montre l'outil qui nous permet de comparer, par zone municipale, la tendance du DC de l'année en cours (ligne rouge) avec la valeur moyenne (ligne bleue) et les valeurs percentiles, pour une vue d'ensemble plus informée (Climatologie années 1991 - 2021).



Dans un avenir proche, nous nous engagerons dans d'autres études approfondies, principalement axées sur la modification des échelles et des valeurs de référence des différents indices afin de les optimiser pour les feux d'hiver toscans.

Le tableau 1 présente les données utilisées pour les calculs.

Tabella 1: Modélisation utilisée pour l'élaboration des produits finis.

	Indici meteorologici di pericolo d'incendio
Modello	Moloch 2.5 km http://www.lamma.toscana.it/modelli/atmo/bolam-e-moloch-info-sui-modelli
Osservazioni	Stazioni Meteorologiche Regione Toscana. Circa 436 stazioni pluviometriche e circa 248 stazioni termometriche
Risoluzione spaziale finale	1km
Risoluzione temporale	Giornaliera con previsione a tre giorni
Dominio spaziale	Regione Toscana
Variabili utilizzate	Umidità, precipitazione, vento e temperatura

Modélisation de la probabilité et de l'intensité des incendies.

L'objectif principal de cette activité développée par le CNR-IBE était d'appliquer des modèles de simulation probabilistes à la zone de coopération maritime italo-française (Sardaigne, Corse, Toscane, Ligurie et Provence-Alpes-Côte d'Azur), couvrant environ 93 000 km² de territoire, afin d'analyser à une haute résolution de 100 m le risque et l'exposition aux incendies de forêt et de caractériser les variations spatiales de la propagation et du comportement du feu entre et au sein des provinces et des régions. La zone d'étude possède divers atouts écologiques, culturels, anthropiques et touristiques qui sont fortement menacés par les incendies de forêt, en particulier pendant la saison estivale. Selon les projections futures, le problème des incendies dans la zone d'étude sera de plus en plus difficile à gérer en raison d'un certain nombre de facteurs prédisposants, notamment le changement climatique, l'abandon des zones agro-sylvopastorales avec l'augmentation de la charge et de la continuité du combustible qui en résulte, et l'expansion des interfaces urbaines dans les zones exposées aux incendies de forêt. Il est donc nécessaire de trouver et de planifier des actions pour atténuer et prévenir ce problème. La méthodologie et les résultats de cette activité ont été présentés dans le travail de Salis et al. 2022 et dans l'Atlas des risques d'incendie (produit T2.2.4).

Méthodologie.

Pour effectuer l'analyse, l'algorithme de temps de parcours minimum (MTT) de Finney (2002), mis en œuvre dans FConstMTT, a été choisi. Pour effectuer des simulations à l'aide de la MTT, une série d'entrées de nature diverse et interdépendante est nécessaire, à savoir des données spatiales de base (topographie et configuration des combustibles), des données météorologiques et climatiques et également des données dérivées de la base de données historiques sur les incendies (humidité du combustible, direction et intensité du vent associées à des événements historiques extrêmes) et enfin des points de départ historiques. L'un des fichiers fondamentaux pour l'exécution des simulations est le fichier "paysage", qui rassemble toutes les données spatiales nécessaires. Pour la construction de ce fichier, les entrées topographiques sont : le modèle numérique terrestre, la pente et l'exposition. Dans cette étude, ces données sont dérivées de la trame de 100 m de résolution du modèle numérique d'élévation (MNE) en mètres au-dessus du niveau de la mer (a.s.l.) de la zone du programme, disponible sur le site Web de Copernicus (<https://land.copernicus.eu/imagery-in-situ/eu-dem/eu-dem-v1.1>).

En ce qui concerne les données du modèle de combustible, une carte harmonisée des types de combustibles a été utilisée pour l'ensemble de la zone du programme, obtenue en

combinant les différentes cartes forestières (Inventaire forestier 2009 - Région Toscane (<https://www.regione.toscana.it/-/geoscopio>), Carte des types de forêts 2013 - Ligurie (<https://geoportal.regione.liguria.it/catalogo/mappe.html#>), DB Forêt 2015 - Corse et Paca (<https://www.geoportail.gouv.fr/>) avec la Corine Land Cover 2012 (<https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc-2012>), afin d'obtenir le plus de détails possible pour la couverture des arbres mais aussi pour les données relatives à tout ce qui ne fait pas partie des forêts. Pour la région de Sardaigne, en l'absence d'une carte forestière actualisée, la carte d'utilisation des sols 2009 a été utilisée au niveau V (<https://www.sardegnegeoportale.it/>), qui est plus détaillée pour la couverture des arbres, combinée à la carte bioclimatique, afin de différencier les caractéristiques des forêts. Après avoir combiné tous les thèmes, les différentes catégories ont été fusionnées en 20 types de combustibles communs.

La trame de 100 m de résolution des modèles de combustible de surface de la zone du programme a ensuite été créée et utilisée comme entrée pour les simulations du comportement et de la propagation des feux de forêt à l'aide du modèle FConstMTT, en attribuant aux types à la fois des modèles de combustible standard (Scott&Burgan, 2005, Anderson, 1982) et des modèles personnalisés dérivés de l'échantillonnage et de l'analyse en laboratoire dans les zones d'étude.

L'agrégation des différents types de végétation de chaque Région et l'attribution des modèles de combustible pour obtenir des thématismes standardisés pour les 5 Régions ont été rendus possibles grâce aux suggestions et aux indications des techniciens et des experts de chaque Région, qui ont également contribué à la création des thématismes relatifs à la couverture des arbres, à la hauteur des plantes, à l'insertion de la première canopée et à la densité de la canopée, nécessaires à la construction du fichier "paysage".

Afin de mettre en évidence les différences d'altitude dans la zone d'étude entre et au sein des régions, les conditions d'humidité du combustible ont été établies en les différenciant sur la base des différentes topographies, selon les classes d'altitude suivantes : Méditerranée < 200 m, basses collines 200-400 m, hautes collines 400-750 m, montagnes > 750 m.

En ce qui concerne la direction du vent utilisée pour les simulations, les conditions associées aux événements historiques ont été sélectionnées pour chaque région, en considérant la période 1998 - 2019, avec une surface brûlée supérieure à 200 ha, en construisant un fichier dans lequel, en plus de la direction, la probabilité d'avoir un vent avec cette direction a également été spécifiée, tandis que la vitesse du vent a été fixée à environ 30 kmh-1, ce qui est généralement une situation associée à des feux de forêt importants et intenses.

Les bases de données des points d'occurrence utilisés ont été fournies par chaque région pour l'Italie et traitées à partir des données du site promethee pour les régions françaises (<https://www.promethee.com/incendies>). Elles ont également été utilisées pour créer la trame de résolution 100 m de la densité des points d'occurrence des incendies dont la surface brûlée est supérieure à 1 ha de la zone du programme, utilisée comme entrée par le modèle de simulation FConstMTT.

Résultats et valeur ajoutée.

Les résultats obtenus à partir de ce travail sont principalement recueillis dans l'Atlas des risques d'incendie (produit T2.2.4) et dans le travail de Salis et al. (2022) et consistent en : la probabilité annuelle de brûlure, la longueur moyenne des flammes (LMC), le rapport source-puits et la probabilité de feu de couronne.

Les résultats montrent les différences entre les indicateurs de propagation et de comportement des incendies de forêt entre les régions, en raison des différences de topographie, c'est-à-dire de l'humidité du combustible, et de la distribution spatiale des motifs de combustible, mais aussi des différences dans le régime des incendies. Il s'agit de la première application à une échelle aussi grande (93 000 km²) et à une résolution aussi élevée (100 m) de modèles de simulation probabilistes.

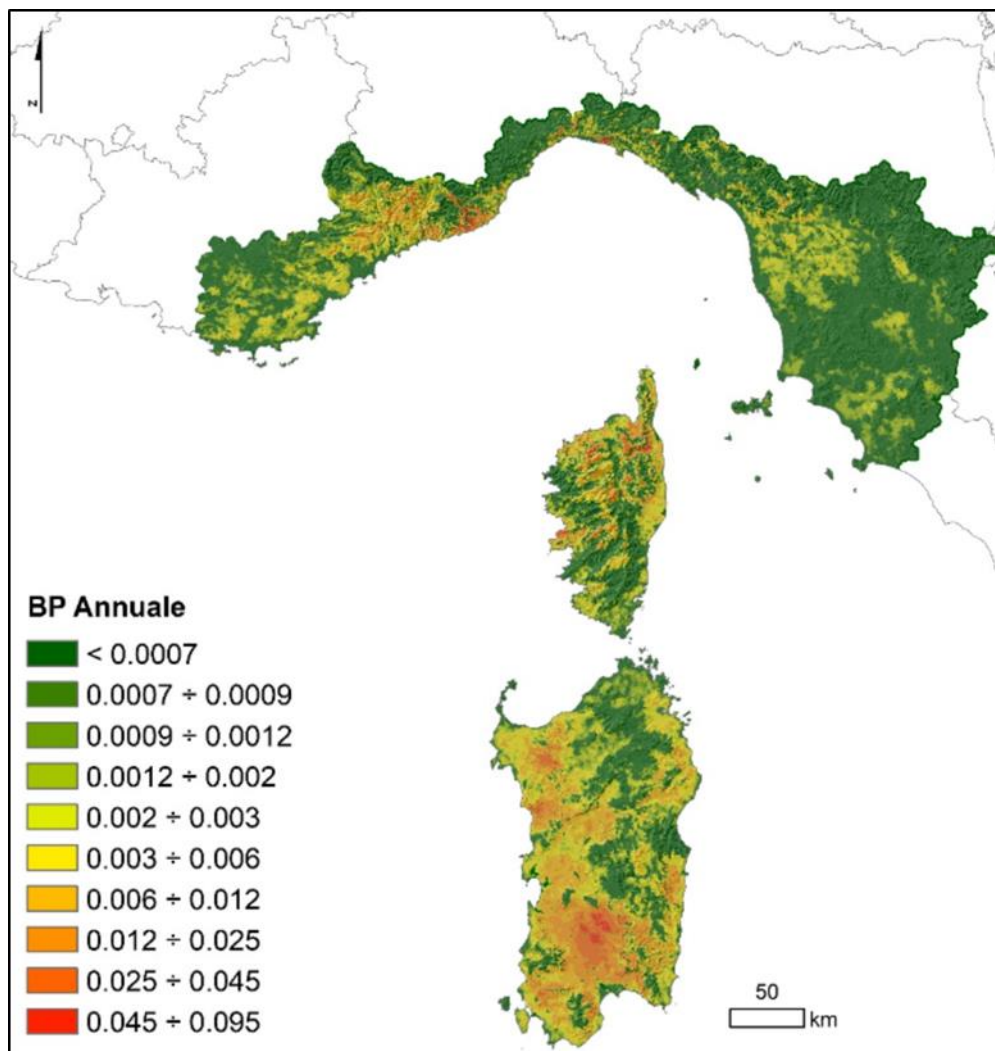


Figura 11. Carte (résolution de 100 m) de la probabilité de brûlage annuel pour la zone du Programme. Cette sortie représente la probabilité annuelle d'avoir un incendie en tenant compte des conditions de référence d'entrée pour les simulations de modélisation. La PA peut aller de 0 (le pixel ne brûle pas) à 1 (le pixel brûle chaque année).

En outre, il s'agit de la première étude réalisée à l'aide de cartes standardisées de répartition des carburants obtenues par une méthodologie objective pour l'ensemble de la zone du programme.

Ces résultats peuvent être utiles pour la planification d'actions communes visant la gestion et la prévention des incendies de forêt dans la zone de coopération Italie-France Maritime.

Modélisation des dangers et des risques.

L'activité développée par l'UNIFI comprenait la réalisation d'une cartographie des combustibles, effectuée au moyen d'une application spécialement développée, qui était préparatoire à la création d'une carte des risques pour les régions côtières de la Toscane.

Cartographie de pointe des variables du combustible forestier par des enquêtes au sol et la télédétection.

La tendance actuelle en matière de cartographie des carburants est d'utiliser à la fois des données au sol et des données issues de techniques de télédétection et de les traiter à l'aide de différentes approches de modélisation et d'intelligence artificielle. En fait, l'intégration de différentes sources de données au sein de l'étude permet d'obtenir de meilleurs résultats finaux, car elle permet de combiner les divers avantages des différentes méthodes. L'utilisation d'approches de modélisation permet d'aborder deux démarches distinctes : (I) régression où l'objectif principal est d'estimer la quantité de combustible présente (D'Este et al. 2021 et Bright et al. 2017) et (II) classification où la catégorie à laquelle appartient l'élément d'entrée est prédite (Heising et al. 2022 et Domingo et al. 2020).

L'utilisation d'une approche de régression est utilisée par D'Este et al. (2021), appliquant trois algorithmes différents (régression linéaire multiple - MLR, Random Forest - RF et Support Vector Machine - SVM) pour estimer et cartographier la quantité de carburant à 1h présente dans une zone pilote. L'étude intègre les variables obtenues à partir de la télédétection (Sentinel-1 et Sentinel-2) et du Lidar avec les données sur les combustibles détectées par l'utilisation de transects. Les résultats montrent, dans ce cas, une bonne performance prédictive de RF par rapport aux autres modèles utilisés. L'étude souligne également l'importance de l'utilisation des données Lidar dans l'estimation de la quantité de carburant au sol. Tandis que dans Bright et al. (2017), les auteurs utilisent le modèle RF seul pour réaliser des cartes de carburant de surface au sein d'une zone d'étude située au Colorado (USA), en utilisant comme covariables une série temporelle Landsat et des données Lidar acquises par vol aérien. L'étude considère un décalage du carburant de 1h, 10h, 100h et enfin 1000h. Les résultats montrent une faible valeur de la variance expliquée pour le modèle, pour chacune des variables considérées avec des valeurs comprises entre 16 et 32%.

L'utilisation d'une approche de classification est utilisée par Heising et al. (2022), où les auteurs proposent l'utilisation d'un modèle RF pour classer les différents types de combustibles présents dans une zone forestière. Le modèle utilise 119 variables prédictives différentes obtenues à partir de l'utilisation de différents types de données (par exemple, les images radar de Sentinel-1, les images multispectrales de Sentinel-2 et les données Lidar des avions) avec des valeurs élevées de précision et de fiabilité du modèle (coefficient kappa de Cohen d'environ 90 %). Les cartes ainsi produites ont ensuite été utilisées pour étudier le risque d'incendie à l'aide d'un modèle de comportement du feu (Flammap).

L'étude de Domingo et al. (2020) propose une comparaison sur la base des différentes valeurs de précision obtenues par deux approches de modélisation distinctes : la machine à vecteur de support (SVM) et la RF pour la classification de différents types de combustibles selon la classification " Prometheus " dans une zone forestière en Espagne. Ces deux modèles distincts utilisent les données Lidar des avions et les images multispectrales Sentinel-2 comme variables covariables, tandis que les données sur le carburant ont été collectées à l'aide de transects. Les résultats de l'étude montrent de meilleurs résultats pour le modèle SVM (précision de classification de 59%) que pour le RF (précision de classification de 54%).

Méthodes de cartographie du carburant.

L'étude des combustibles forestiers est l'une des parties fondamentales de toute enquête sur la prévision et la prévention des incendies. Au fil des ans, diverses méthodes d'enquête ont été développées, que l'on peut résumer en quatre types (Woodall et al. 2009)

les zones d'échantillonnage,
zones d'essai circulaires à rayon variable
transects linéaires,
estimation visuelle.

La première typologie, bien qu'elle soit appliquée de différentes manières et applications, consiste à surveiller le combustible forestier dans des parcelles d'essai de formes et de tailles diverses. Le plus souvent, on utilise des parcelles d'essai micro-carrées de 1 m x 1 m. Dans ces zones, tous les matériaux présents sur le sol sont enlevés puis, souvent en laboratoire, divisés en différents types de combustibles, séchés et pesés. Les valeurs de poids de matière sèche obtenues sont ensuite facilement rapportées par hectare.

Le deuxième type d'enquête est similaire au premier mais est réalisé sur des zones d'essai circulaires, souvent concentriques, dont le rayon varie en fonction du type de combustible à étudier. En général, le rayon de la zone augmente à mesure que la taille du combustible augmente.

Le troisième type d'enquête, par transects, consiste à enregistrer tous les combustibles qui coupent une ligne droite au sol. Pour chaque combustible, on note son type ou, directement, sa taille. Il existe diverses applications de la méthode qui varient fondamentalement en termes de longueur de transect, d'orientation, de nombre de transects et de chevauchement (croix ou astérisque).

La dernière méthodologie implique l'application de zones d'essai avec une estimation du carburant effectuée visuellement, donc de manière non destructive et rapide.

Comme il est évident, les quatre méthodes d'enquête varient dans leur application de la taille de l'échantillon en fonction de la précision de l'inventaire à obtenir.

L'application FuelGeoData - Application d'une méthodologie rapide pour la caractérisation des carburants.

Dans le cadre du projet MED-Star, une application a été produite pour permettre l'étude des combustibles forestiers de manière simple, rapide et automatiquement géoréférencée. L'application FuelGeoData, réalisée par le Département des Sciences et Technologies Agricoles, Alimentaires, Environnementales et Forestières de l'Université de Florence (DAGRI) en collaboration avec la société Vanzotech srl, envisage une approche des combustibles forestiers d'un point de vue quantitatif inspirée de la "Photoload Sampling Technique" (Keane and Dickinson 2007). La méthode implique une estimation quantitative des charges de combustible forestier présentes en effectuant une analyse visuelle de la situation réelle et en la comparant à diverses images représentatives des quantités possibles de combustible présentes. L'enquêteur collecte les données et analyse une parcelle de 1 m x 1 m représentative de la zone d'étude. L'opération est répétée pour tous les différents types de combustibles forestiers (figure 12).

Latitudine:	Latitudine	
Longitudine:	Longitudine	
Time Lag 1h:	Time Lag 1h	scegli immagine associata
Time Lag 10h:	Time Lag 10h	scegli immagine associata
Time Lag 100h:	Time Lag 100h	scegli immagine associata
Erbacee monocotiled. vive:	Erbacee monocotiled. vive	scegli immagine associata
Erbacee dicotiled. vive:	Erbacee dicotiled. vive	scegli immagine associata
Erbacee secche:	Erbacee secche	scegli immagine associata
Arbusti:	Arbusti	scegli immagine associata
Altezza arbusti (in m):	Altezza arbusti (in m)	
Struttura del bosco:	Struttura del bosco	scegli immagine associata
Altezza Lettieria:	Altezza Lettieria	

Figura 12: Écran de saisie des données de l'application FuelGeoData à partir duquel tous les types de carburant considérés dans l'enquête peuvent être déduits.

La méthode proposée par Keane et Dickinson (2007) a été modifiée et simplifiée pour tenir compte des caractéristiques des peuplements forestiers à étudier (par exemple, la classe de

décalage horaire de 1 000 h caractérisée par un diamètre supérieur à 3 pouces/7,5 cm n'a pas été prise en compte).

Le premier type de combustible considéré dans l'enquête est le combustible le plus fin (diamètre <0,6 cm), correspondant aux classes de décalage horaire de 1 heure ; pour sa quantification, la situation trouvée sur le terrain, dans une zone de 1 m², est comparée à l'une des 12 images obtenues par la méthode "Photoload Sampling Technique" (Keane et Dickinson 2007), chacune d'entre elles étant associée à une quantité donnée de matériau, exprimée en kg/m² (Figure 13).

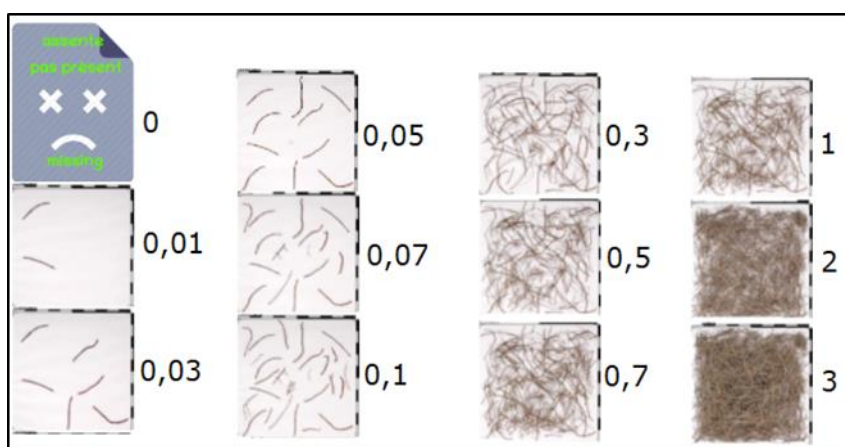


Figura 13: Images de référence pour la quantification du carburant (valeur exprimée en kg/m²) décalage temporel 1h.

La même opération est ensuite effectuée pour la classe de combustible de plus grand diamètre (entre 0,6 et 2,5 cm) correspondant aux classes de décalage horaire de 10h et avec la classe encore plus grande (diamètre entre 2,5 et 7,5 cm) correspondant au décalage horaire de 100h (Figure 14).

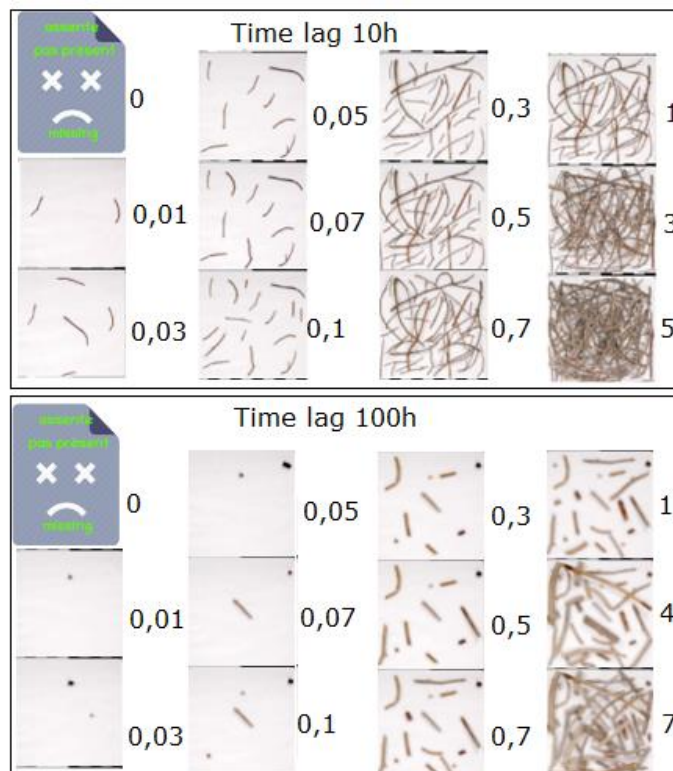


Figura 14: Images de référence pour la quantification du carburant (valeur exprimée en kg/m²) décalage de 10h (ci-dessus) et 100h (ci-dessous)

Ensuite, il est possible d'analyser la quantité de combustible herbacé vivant, en distinguant les monocotylédones et les dicotylédones, et le combustible herbacé sec. Ici aussi, une comparaison visuelle est faite entre le combustible possible présent dans la zone de relevé ponctuel et les différentes quantités possibles rapportées dans les 10 images pour chaque catégorie de combustible herbacé (Figure 15).

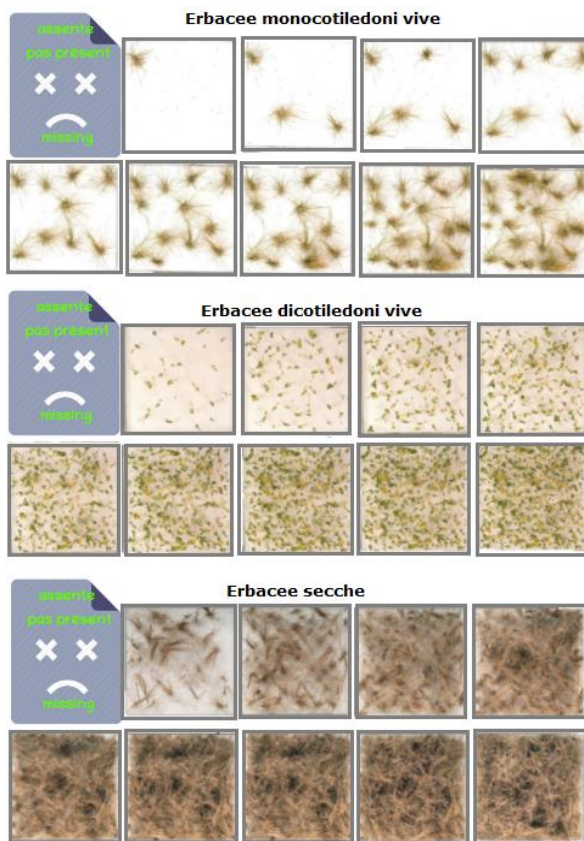


Figura 15: Images de référence pour la quantification du carburant herbacé monocotylédones vivant (en haut), du carburant dicotylédones vivant (au milieu) et du carburant herbacé sec (en bas).

L'étape suivante consiste à recenser les arbustes présents, comme toujours en comparant la situation réelle avec les 10 images préchargées dans l'application, dont la valeur moyenne de la hauteur exprimée en mètres est également enregistrée (Figure 16).

Pour la catégorie "Arbustes", il est également nécessaire de saisir leur hauteur moyenne, exprimée en mètres (Figure 16).



Figura 16: Images de référence de la classification des carburants pour la catégorie « Arbustes ».

Pour conclure l'étude de la tache individuelle, il est également nécessaire de classer la structure de la forêt et de rapporter la hauteur de la litière, exprimée en centimètres (Figure 17).

Afin de classer la structure de la forêt, des images de référence ont été incluses pour faciliter l'opération (Figure 17).

Il est également possible de prendre une photo de la micro-parcelle relevée afin de pouvoir vérifier a posteriori la classification des différents types de combustible.

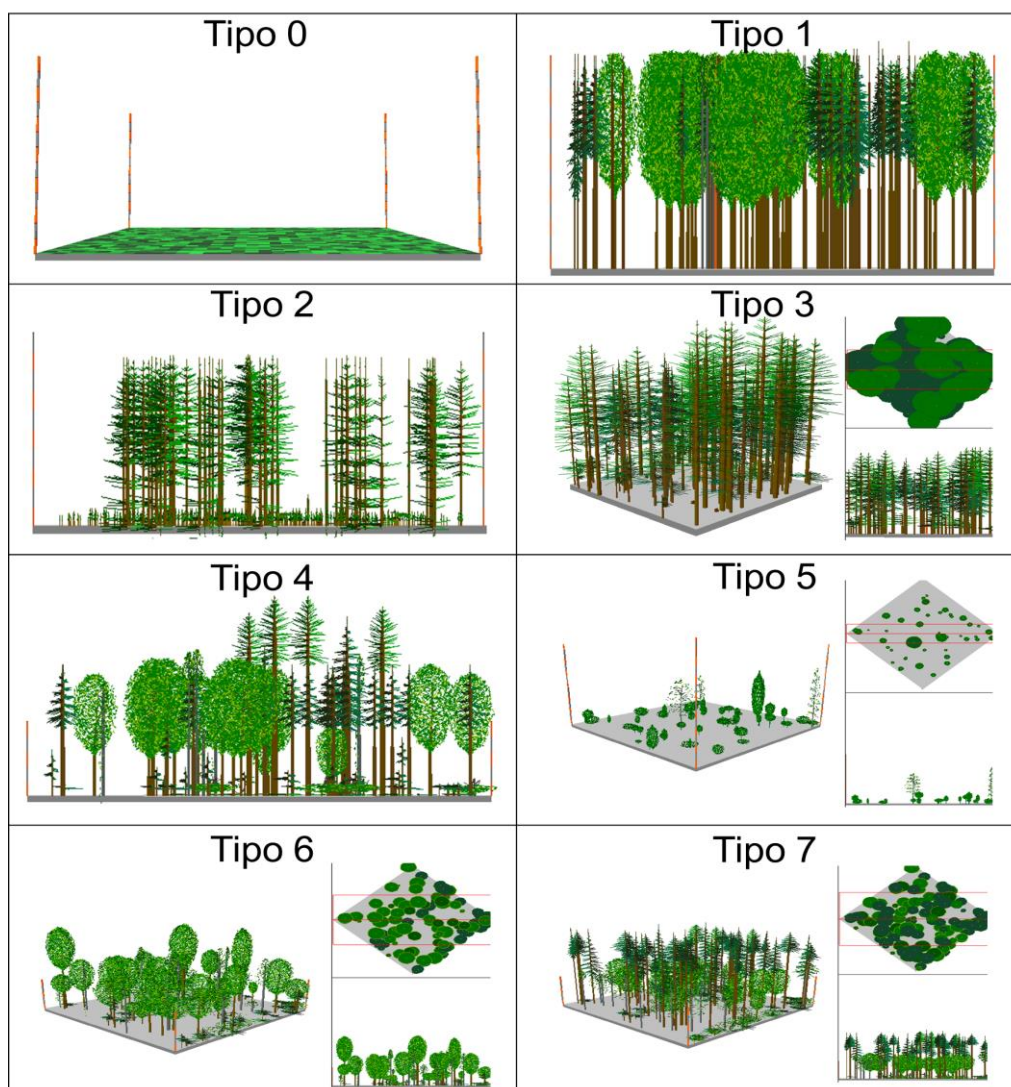


Figura 17: Images de référence pour classer la structure de la forêt. Dans le détail, zone sans végétation arboricole/arbustive ou présence d'une végétation très clairsemée (prairies, pâturages, cultures, etc. (type 0), monoplan (type 1), forêt biplane (type 2), forêt multiplane dense (type 3), forêt clairsemée (type 4), zone à végétation basse, clairsemée, principalement arbustive (type 5), forêt multiplane de densité moyenne (type 6) ou si en forêt mixte, assez dense (type 7).

Le tableau 2 résume les valeurs de charge des différents types de carburant associés aux différentes images.

Tabella 2: Valori di carico (kg m⁻²) dei differenti tipi di carburanti associati alle differenti immagini.

1h (kg m ⁻²)	10h (kg m ⁻²)	100h (kg m ⁻²)	monocotiledo ni (kg m ⁻²)	dicotiledoni (kg m ⁻²)	erbace e (kg m ⁻²)	arbusti (kg m ⁻²)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,05	0,01
0,03	0,03	0,03	0,03	0,01	0,10	0,03
0,05	0,05	0,05	0,05	0,02	0,15	0,05
0,07	0,07	0,07	0,07	0,03	0,20	0,07
0,10	0,10	0,10	0,09	0,04	0,25	0,09
0,30	0,30	0,30	0,12	0,05	0,30	0,12
0,50	0,50	0,50	0,15	0,06	0,35	0,15
0,70	0,70	0,70	0,18	0,07	0,40	0,18
1,00	1,00	1,00	0,25	0,08	0,45	0,25
2,00	3,00	4,00				
3,00	5,00	7,00				

Collecte de données sur les carburants.

Identification des points à relever.

Sur le territoire des provinces côtières de la Toscane, à l'aide de la carte d'occupation des sols de 2019, on a mis en évidence les zones sensibles aux incendies de forêt, c'est-à-dire celles où un incendie pourrait se produire, avec la possibilité de se propager, en affectant la forêt, les zones assimilées et les plantes d'arboriculture forestière au sens de l'article 66, ou les terres non cultivées, les terres cultivées et les pâturages situés à moins de 50 mètres de ces zones (art. 69 L.R.Toscana 39/2000).

Une fois ces zones isolées, le réseau routier d'OpenStreetMap y a été superposé pour mettre en évidence les zones les plus facilement accessibles. Enfin, la différence entre les deux couches a été faite, puis un point a été placé tous les 100 m et à environ 20 m du bord de la chaussée afin d'éviter de relever des zones sensibles à l'effet de bord ou, en tout cas, soumises à l'entretien ordinaire des routes.

En appliquant cette méthodologie, environ 16 000 points ont été identifiés (Figure 18). Au cours de l'enquête, les points qui n'ont pu être atteints en raison de la présence d'obstacles physiques ou d'interdictions d'accès à des propriétés privées ont été remplacés, lorsque cela était possible, par des points situés dans des zones voisines.



Interreg



UNION EUROPEENNE
UNIONE EUROPEA

MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fonds européen de développement régional
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



MED-Star

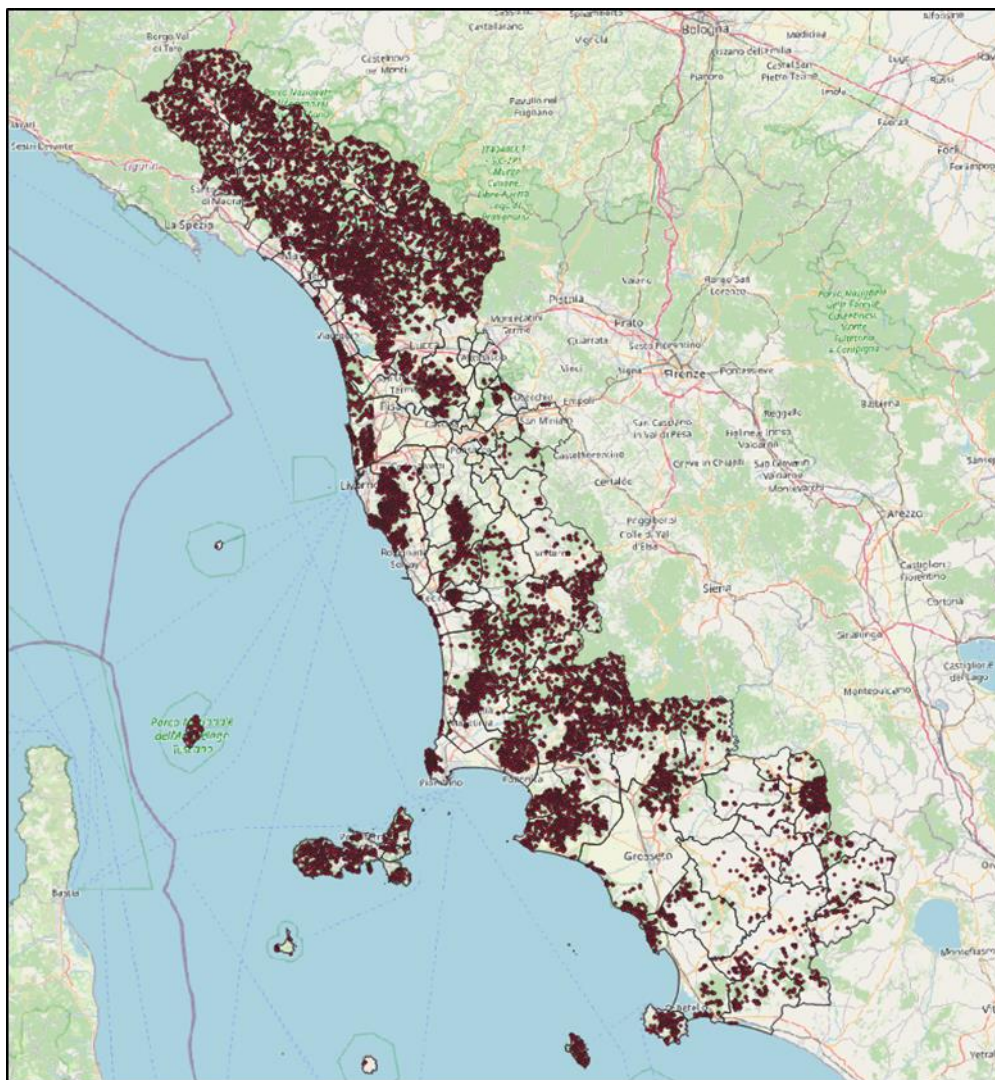


Figura 18: Identification d'environ 16 000 points à détecter sur le territoire des provinces côtières de la Toscane.

La collecte des données.

Les enquêtes ont été réalisées principalement par les techniciens forestiers et les opérateurs des Unions des Municipalités dans les provinces du projet. Pour les zones non couvertes par celles-ci, l'enquête a été confiée à une société externe en plus d'être réalisée par le personnel de DAGRI lui-même et les étudiants impliqués dans le projet pour l'élaboration de leur mémoire de maîtrise. Tous les enquêteurs ont reçu une formation spécifique, théorique

et pratique, sur la manière de réaliser l'enquête. Tout au long de la campagne d'enquête, une assistance constante a été fournie ainsi qu'un contrôle des données effectivement relevées. Dans certains cas, des problèmes de synchronisation des données se sont produits, ce qui a nécessité le transfert manuel des données du dispositif d'enquête vers la base de données.

Études préliminaires sur la cartographie des carburants et des risques.

Enquête sur les relations entre la quantité de combustible forestier, les types de végétation et la hauteur des peuplements dans les zones côtières du nord de la Toscane.

L'objectif de l'enquête menée sur cette ligne était d'étudier la relation entre la quantité de combustibles mesurée au sol, le type de végétation correspondant et la hauteur du peuplement. Les données sur les différents types de végétation ont été obtenues à partir de la carte actuelle de la végétation forestière de la région de Toscane, qui représente les principaux types de forêts de la région, classés par espèces d'arbres dominantes. Les données relatives à la hauteur des peuplements ont été obtenues par l'utilisation d'un modèle de hauteur de couronne (CHM), notamment celui produit par la NASA dans le cadre du projet GEDI. Les analyses ont été traitées à l'aide du langage de programmation statistique R-cran. Les résultats ont révélé une image de forte inhomogénéité dans la distribution des différentes catégories de combustible, montrant une tendance à l'augmentation de leurs valeurs en fonction de la hauteur et donc de l'âge des peuplements. Les résultats ont été traités à l'aide de l'algorithme CART (classification and regression tree) et ont permis de distinguer des classes de hauteur par type de forêt sur la base de valeurs seuils des types de combustibles caractérisant la structure spécifique du peuplement. La zone d'étude du projet, correspondant au territoire des 5 provinces impliquées dans le projet MED-Star (dans l'ordre Massa-Carrara, Lucca, Pisa, Livorno et Grosseto), est très hétérogène et caractérisée par des conditions climatiques différentes (des zones à climat méditerranéen aux zones à climat tempéré-humide) et donc par une composition différente de la végétation forestière. Les données sur les combustibles ont été obtenues à l'aide de l'application "FuelGeoData" (voir § 2), tandis que les données sur la hauteur ont été obtenues à l'aide d'un CHM ; en particulier, le choix s'est porté sur l'utilisation d'une carte connue sous le nom de "hauteur globale de la canopée forestière" réalisée par Potapov et al. (2020) qui intègre des données Lidar réalisées dans le cadre du projet GEDI de la NASA avec une série temporelle Landsat. La base de données des différents types de végétation utilisés a été publiée par la Région Toscane en 2004, mais compte tenu du nombre de points pour chaque type de végétation, seuls les suivants ont été analysés : Forêts de chêne vert, Cerreti, forêts de châtaigniers, forêts de hêtres, forêts sclérophylles, forêts thermophiles à dominante feuillue, forêts mésophiles et sciaphiles à dominante feuillue, forêts de pins pures ou mixtes d'espèces indigènes. L'analyse des données a été réalisée à l'aide de l'algorithme d'apprentissage automatique CART avec une approche de régression. L'analyse a révélé une forte variabilité en ce qui concerne les différentes quantités de combustible, qui est

potentiellement liée à un certain nombre d'aspects problématiques au sein des données sources (voir GEDI et la faible précision de l'ensemble de données sur les types de végétation).

Caractérisation quantitative des combustibles forestiers à l'aide de techniques d'analyse géostatistique appliquées aux zones côtières de la Toscane.

Une autre enquête préliminaire importante a été la production de cartes de carburant. Comme mentionné dans le premier chapitre, les données collectées sur le terrain ont été complétées et traitées avec des données collectées à l'aide de techniques de télédétection, afin d'étendre les valeurs mesurées aux zones où les données sont insuffisantes. L'outil choisi pour ce faire est le RF, qui est également le plus utilisé dans la littérature (Piyush et al. 2020).

Dans le chapitre sur les cartes de carburant, la méthode utilisée pour la production sera examinée en détail.

Analyse comparative de différentes approches pour la production de cartes des risques d'incendie de forêt.

Une analyse de la littérature disponible pour la production de cartes de risques d'incendie montre que les facteurs les plus analysés sont : la pente, l'exposition, l'altitude, les types de couverture terrestre et de forêt, la distance par rapport aux routes et/ou aux zones résidentielles. A ces facteurs s'en ajoutent d'autres dans le cas du risque dynamique : la pluviométrie, les températures moyennes journalières et mensuelles, les vents dominants. L'objectif de ce travail est de produire une carte de risque statique, qui ne tient donc pas compte des facteurs thermo-pluviométriques.

Comme il existe déjà en Italie une méthodologie approuvée au niveau ministériel et appliquée dans les zones protégées, celle-ci a été choisie comme point de départ.

Cartes produites et méthodologies appliquées.

Carte de carburante.

Pour la construction des cartes de combustible, les variables suivantes ont été prises en compte : décalage temporel du combustible 1h, 10h, 100h, plantes herbacées

monocotylédones vivantes, plantes herbacées dicotylédones vivantes, plantes herbacées mortes et enfin arbustes.

Un modèle de classification RF a été créé pour chacune de ces variables, en utilisant les données obtenues par les instruments de télédétection de Sentinel-2 comme variables covariables. Les valeurs de réflectance ont été obtenues à partir d'un composite annuel d'images par l'utilisation du moteur Google Earth en utilisant la médiane des valeurs des pixels. En plus des valeurs de réflectance des différentes variables, le modèle numérique d'élévation "Tintaly", disponible pour l'ensemble du territoire national avec une résolution spatiale de 10 m, produit par l'Institut national de géologie et de volcanologie de Pise, a été utilisé. A partir de ces données, des informations ont été obtenues concernant la concavité, la pente et l'exposition également utilisées dans le modèle. Les valeurs concernant la hauteur du peuplement ont été obtenues à partir de la carte "global forest cover heights" produite par Potapov et al. (2021), dérivée de l'union d'une série temporelle Landsat et de données obtenues par l'utilisation du satellite NASA - GEDI.

Tout d'abord, une analyse en composantes principales a été effectuée pour chacune des variables étudiées sur la base de données source afin d'identifier les variables les plus représentatives.

Les performances du modèle de classification ont été évaluées en termes de précision. Le tableau ci-dessous montre les valeurs de précision obtenues pour les différentes variables étudiées.

Tabella 3: Valeurs de précision obtenues à partir des valeurs collectées avec l'application FuelGeoData

1h (kg m ⁻²)	10h (kg m ⁻²)	100h (kg m ⁻²)	monocotiledoni (kg m ⁻²)	dicotiledon i (kg m ⁻²)	erbacee (kg m ⁻²)	arbusti (kg m ⁻²)
0,18	0,18	0,28	0,26	0,49	0,56	0,18

Afin d'essayer d'augmenter la précision du modèle, une première tentative a été entreprise en stratifiant l'enquête par utilisation des terres. Les valeurs de précision obtenues sont présentées dans le tableau 4.

Tabella 4: Valeurs de précision obtenues à partir de la stratification des points détectés dans les classes d'utilisation des sols

Classe uso suolo	1h (kg m ⁻²)	10h (kg m ⁻²)	100h (kg m ⁻²)	mono cotiledoni (kg m ⁻²)	dico tiledoni (kg m ⁻²)	erbacee (kg m ⁻²)	arbusti (kg m ⁻²)
aree aperte	0,34	0,35	0,45	0,29	0,56	0,51	0,03
bosco latifoglie	0,17	0,16	0,24	0,25	0,56	0,58	0,17

zone di pertinenza	0,17	0,18	0,45	0,23	0,52	0,49	0,18
boschi misti	0,15	0,17	0,25	0,34	0,43	0,56	0,14
boschi conifere	0,19	0,16	0,30	0,28	0,43	0,56	0,17
media	0,20	0,20	0,34	0,28	0,50	0,54	0,14

N'ayant pas obtenu des valeurs de précision meilleures et/ou comparables à celles trouvées dans la littérature, il a été décidé d'entreprendre un second traitement visant à regrouper les valeurs mesurées pour chaque type de combustible en trois catégories et, ensuite, à les stratifier par utilisation du sol. Les valeurs de précision sont présentées ci-dessous dans le tableau 5 et le tableau 6.

Tabella 5: Valori di precisione ottenuti raggruppando ogni variabile in 3 classi diverse

1h (kg m ⁻²)	10h (kg m ⁻²)	100h (kg m ⁻²)	monocotiledoni (kg m ⁻²)	dicotiledoni (kg m ⁻²)	erbacee (kg m ⁻²)	arbusti (kg m ⁻²)
0,53	0,60	0,56	0,73	0,80	0,96	0,80

Tabella 6: Valori di precisione ottenuti raggruppando ogni variabile in 3 classi diverse e stratificando per uso delle terre.

Classe uso suolo	1h (kg m ⁻²)	10h (kg m ⁻²)	100h (kg m ⁻²)	monocotiledoni (kg m ⁻²)	dicotiledoni (kg m ⁻²)	erbacee (kg m ⁻²)	arbusti (kg m ⁻²)
aree aperte	0,63	0,65	0,62	0,66	0,83	0,94	0,80
bosco latifoglie	0,54	0,58	0,54	0,74	0,80	0,96	0,81
zone di pertinenza	0,53	0,67	0,07	0,68	0,78	0,91	0,79
boschi misti	0,50	0,62	0,54	0,82	0,79	0,97	0,79
boschi conifere	0,49	0,59	0,56	0,76	0,77	0,96	0,76
media	0,54	0,62	0,47	0,73	0,79	0,95	0,79

Le meilleur résultat a été obtenu en regroupant chaque variable de carburant en 3 classes différentes. Ce tableau a ensuite été utilisé pour un traitement ultérieur.

Carte des risques selon le Manuel d'application du " Schéma du plan A.I.B. dans les parcs nationaux - 2018 ".

La première carte de risque produite est celle obtenue en utilisant la méthodologie rapportée par Bertani et al. (2018), convenablement modifiée pour l'étendre également en dehors des parcs nationaux. La seule modification apportée à ce processus concerne l'utilisation des sols, ayant utilisé la classification proposée dans le précédent manuel ministériel (https://www.mite.gov.it/sites/default/files/archivio/allegati/aib/Manuale_tecnico_per_la_pianificazione_anti_incendi.pdf).

Le risque d'incendie de forêt est compris comme la somme de deux composantes : le danger, qui exprime la probabilité qu'un incendie se produise ainsi que la difficulté à l'éteindre, et la gravité, qui exprime les conséquences négatives subies par les écosystèmes naturels et les infrastructures à la suite d'un incendie.

Ainsi :

Carte des risques = carte des dangers + carte de la gravité

La carte des risques est créée en tenant compte de l'occurrence, de la propagation et de la difficulté d'extinction des incendies dans l'unité élémentaire (pixel de taille de référence). En outre, des informations sur les incendies passés (quantité et fréquence des incendies) et sur les facteurs morphologiques et climatiques de la zone sont incluses dans le traitement de la carte.

Les paramètres utilisés pour traiter la carte des dangers ont été associés aux indices de danger tels que rapportés dans le manuel de référence.

Par conséquent :

Carte des risques = facteurs prédisposants x incendies passés

Où :

facteurs prédisposants = $0,40 \times C + 0,30 \times UdS + 0,15 \times E + 0,15 \times P$

C = Phytoclimat

UdS = Utilisation des sols avec approfondissement sur la végétation sylvo-pastorale

E = Exposition

P = Pente

La carte de gravité exprime les dommages et/ou les changements négatifs provoqués par le passage d'un incendie de forêt. La superposition et la somme des différentes couches d'information utilisées (voir formule ci-dessous), sont reclassées et transformées en format raster selon le "critère de prévalence". Le résultat de cette opération renvoie une carte représentant la classification de gravité de chaque unité élémentaire (pixel de taille de

référence). La valeur obtenue est associée à une classe de gravité (faible, moyen-faible, moyen, moyen-haut ou haut).

D'où :

Carte de gravité = UdS + carte SCI/ZPS/RNS + carte HABITAT/SPECIE

Où :

UdS = Carte de couverture silvo-pastorale

Carte SCI/ZPS/RNS = Carte des SCI/SAC et des RNS

Carte HABITAT/SPECIE = Carte des habitats et des espèces prioritaires

La carte de risque est dérivée de la somme pondérée des valeurs par pixel des cartes de danger et de gravité. Un poids de 10 est attribué à l'aléa et de 1 à la gravité, la carte ainsi obtenue est reclassée des 5 classes initiales en 3 classes de risque (faible, moyen et élevé) suivant le tableau 6 du manuel de référence.

Tabella 7: Matrice pour la définition de la classe de risque dans les 3 niveaux descriptifs basés sur les valeurs de danger et de gravité obtenues. Vert = niveau de risque faible, jaune = niveau de risque moyen et rouge = niveau de risque élevé (source : https://www.mite.gov.it/sites/default/files/archivio/allegati/aib/Manuale_schema_Piano_AIB_PN_ottobre2018.pdf).

			Pericolosità				
			Bassa	Medio - Bassa	Media	Medio - Alta	Alta
			10	20	30	40	50
Gravità	Bassa	1	11	21	31	41	51
	Medio - Bassa	2	12	22	32	42	52
	Media	3	13	23	33	43	53
	Medio - Alta	4	14	24	34	44	54
	Alta	5	15	25	35	45	55

Mappe del rischio prodotta secondo la metodologia proposta in ambito del progetto.

Afin d'intégrer les valeurs dérivées de la carte des combustibles dans la carte des risques, l'inter-traitement de la carte obtenue selon la méthodologie rapportée par Bertani et al. (2018) a été modifié.

La carte des risques a été obtenue en utilisant la même formule que celle rapportée par Bertani et al. (2018).

Ainsi :

Carte des risques = facteurs prédisposants x incendies passés

Au lieu de cela, la carte des facteurs prédisposants (qui fait partie de la carte des risques) a été modifiée en éliminant la composante phytoclimatique. L'exclusion de cette variable a été jugée nécessaire en raison de la couverture incomplète des provinces impliquées dans le projet et de la discrimination, pour la Région Toscane, de seulement deux zones phytoclimatiques.

Les données sur les combustibles forestiers ont été saisies comme suit :

$$\text{Facteurs prédisposants} = 0,55 \times \text{Comb.} + 0,20 \times \text{E} + 0,25 \times \text{P}$$

$$\text{Peigne.} = (\text{h1} + \text{h10} + \text{Erb.tot}) \times 0,5 + (\text{h100} \times 5) \times 0,15 + (\text{Arbustes} \times 5) \times 0,35$$

Erb.tot = la somme de tous les combustibles herbacés (monocotylédones, dicotylédones et herbes mortes)

E = Exposition

P = Pente

La carte de gravité a été partiellement révisée à partir de la formule ministérielle.

Ainsi :

$$\text{Carte de gravité} = \text{UdS} \times 0,25 + (\text{carte SCI/ZPS/RNS/SitesUnesco} + \text{carte HABITAT/SPECIE}) \times 0,25 + \text{Interface} \times 0,5$$

Où :

UdS = Carte de couverture sylvo-pastorale selon la circulaire ministérielle, en reclassant les zones non sylvo-pastorales avec des valeurs de 5 à 25.

Map SCI/ZPS/RNS/Unesco Sites = Carte des SCI/SAC, RNS et sites Unesco

Carte HABITAT/SPECIE = Carte des habitats et des espèces prioritaires reclassés selon la couche de valeur écologique ISPRA

Interface = distance par rapport à la zone bâtie

La carte des risques est alors obtenue à partir de la somme de la carte des dangers (reclassée en 5 classes) avec la carte de la gravité (également reclassée en 5 valeurs), divisée par deux.

Donc :

$$\text{Carte de risque} = (\text{Danger} + \text{Gravité})/2.$$

Cartes finales développées.

En conclusion, avec la méthodologie proposée dans le projet, on a essayé de compenser les limites de la carte des risques dérivée du manuel ministériel. En fait, il y a peu de couches d'information disponibles avec le détail requis pour les grandes zones, telles que les zones provinciales ou régionales. En particulier, en ce qui concerne le phytoclimat, de nombreuses données NA ont été trouvées dans la couche indiquée dans le manuel. En outre, un poids trop important a été accordé à cette donnée, ce qui a atténué l'influence des autres variables.

L'introduction de la carte des combustibles a permis d'atteindre un niveau d'exactitude et de précision supérieur à celui de la méthodologie traditionnelle utilisant l'utilisation des sols.

Enfin, il est important de souligner que la méthodologie appliquée peut également être reproduite dans les autres zones partenaires du projet en appliquant les modifications appropriées.



Interreg



UNION EUROPEENNE
UNIONE EUROPEA

MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fonds européen de développement régional
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



MED-Star

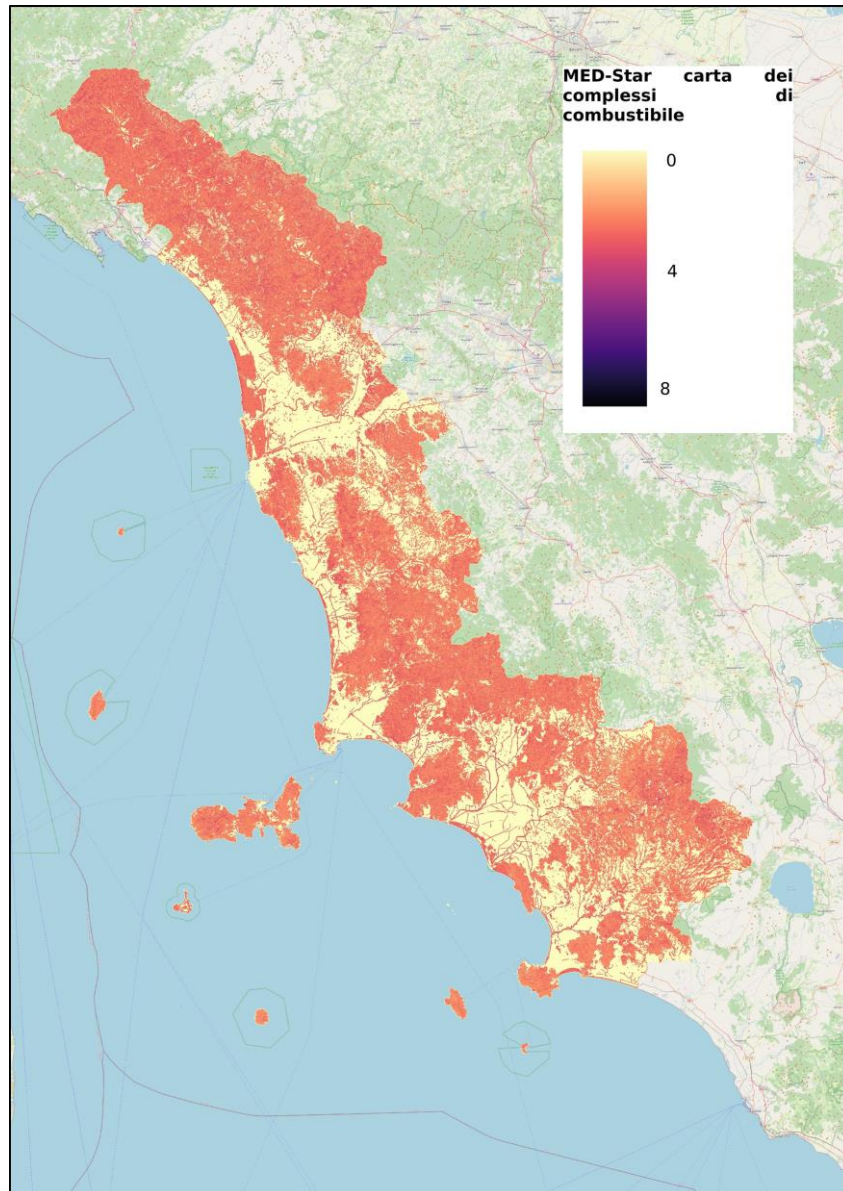


Figura 4: Carte des complexes de combustibles.



Interreg



UNION EUROPEENNE
UNIONE EUROPEA

MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fonds européen de développement régional
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



MED-Star

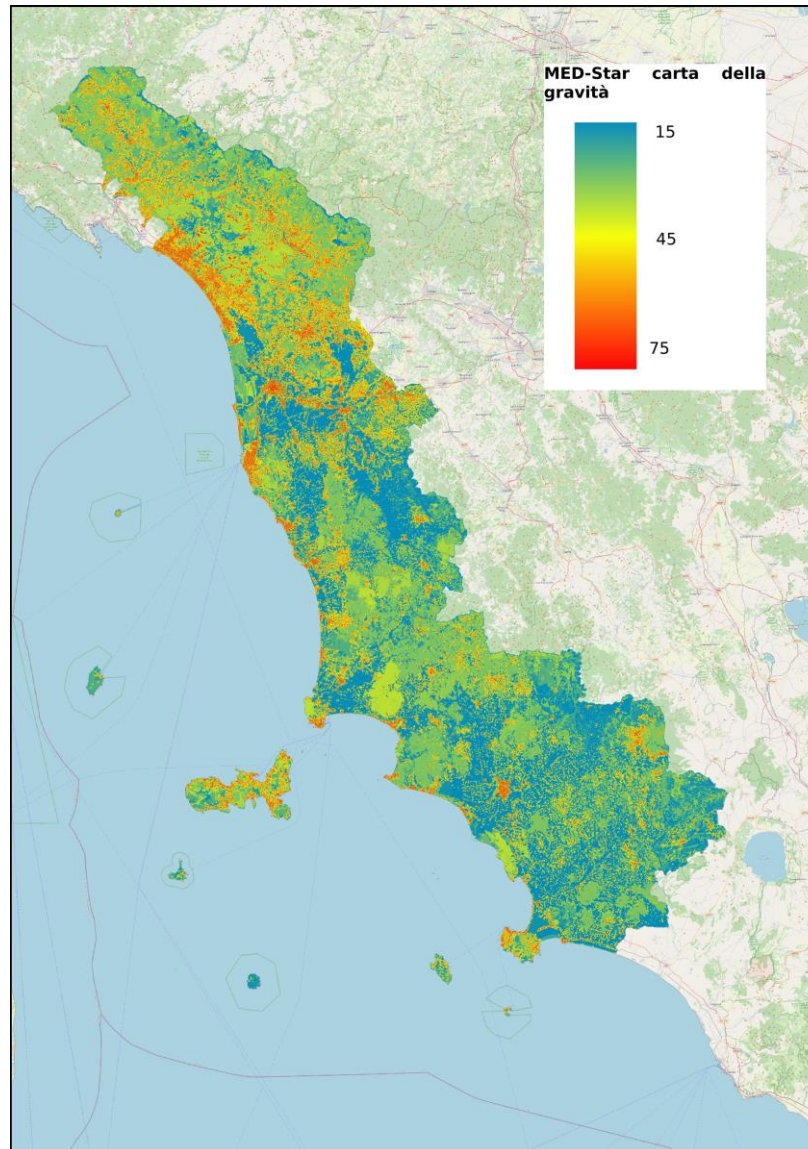


Figura 5: Carte gravimétrique.



Interreg



UNION EUROPEENNE
UNIONE EUROPEA

MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fonds européen de développement régional
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



MED-Star

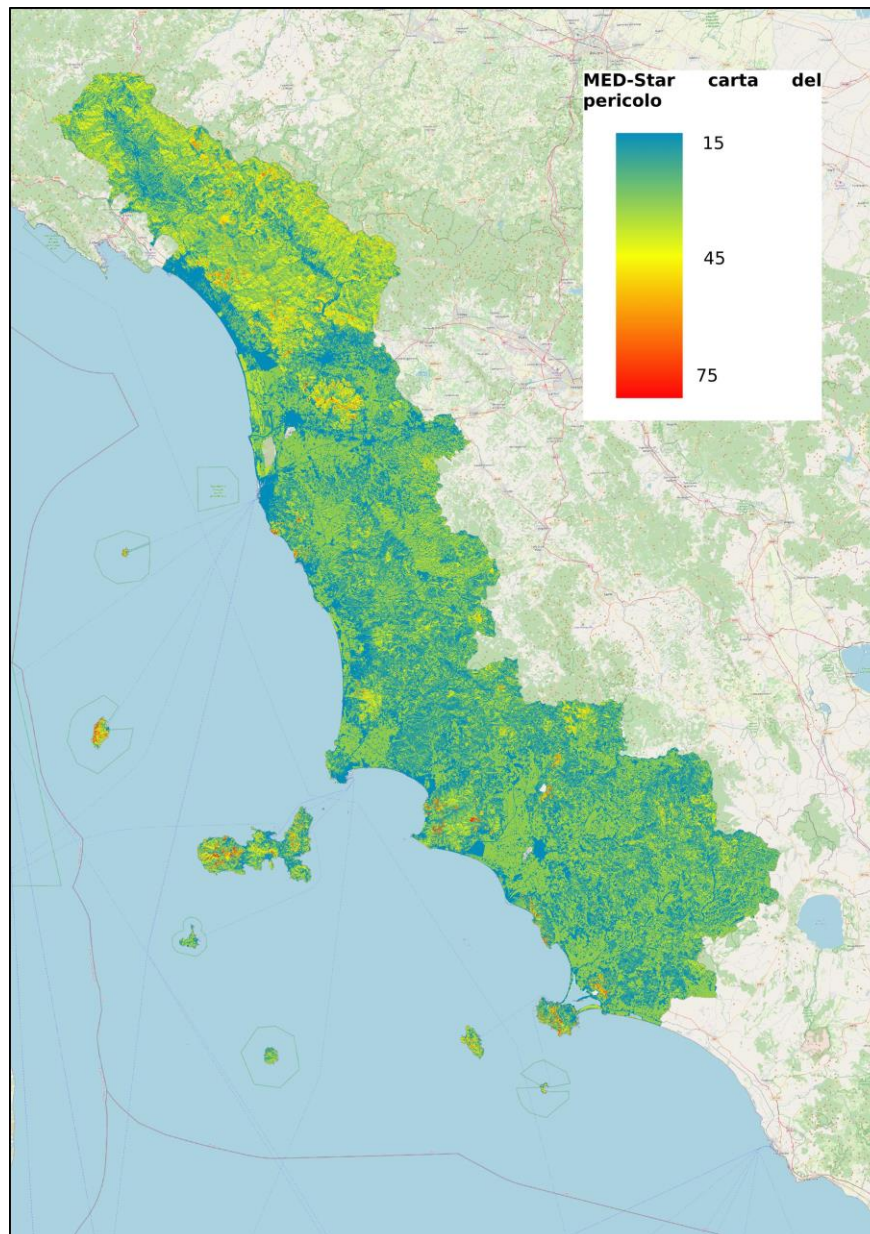


Figura 6: Carte du danger.



Interreg



UNION EUROPÉENNE
UNIONE EUROPEA

MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fonds européen de développement régional
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



MED-Star

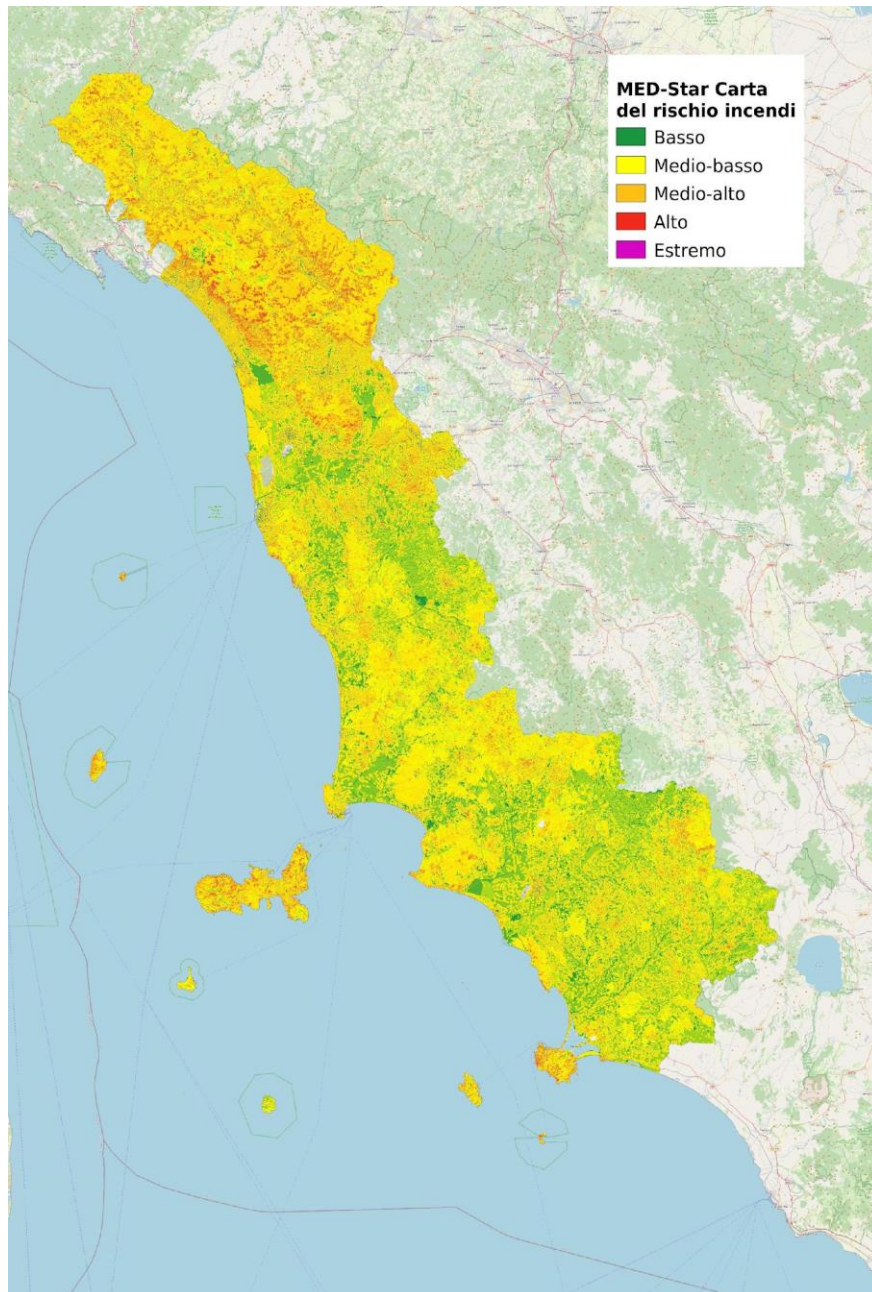


Figura 7: Carte des risques.

Cartes saisonnières de susceptibilité aux feux de forêt.

La Fondation CIMA a développé une méthodologie basée sur des algorithmes d'apprentissage automatique pour produire des cartes de susceptibilité aux feux de forêt pour les saisons d'été et d'hiver. La méthodologie, les données d'entrée utilisées et les résultats fournis par la méthodologie sont décrits ci-dessous.

Introduction à la méthodologie adoptée.

Le rapport vise à présenter deux cartes de susceptibilité aux feux de forêt (une par saison) pour la zone d'étude définie par le projet MedStar. La répartition saisonnière suivante sera suivie :

Saison d'hiver : novembre, décembre, janvier, février, mars, avril.

Saison d'été : mai, juin, juillet, août, septembre, octobre.

L'objectif de la carte de susceptibilité est de mettre en évidence les zones présentant la plus forte probabilité d'occurrence d'un incendie de forêt dans la zone examinée.

La méthode utilisée pour produire cette carte consiste à appliquer un modèle d'apprentissage automatique basé sur l'algorithme de classification Random Forest. L'analyse est effectuée à une résolution spatiale de 100 mètres sur l'ensemble du territoire du projet. Chaque pixel est caractérisé par un ensemble de variables d'entrée qui peuvent être géographiques, anthropiques ou climatiques. L'ensemble des pixels sur toute la zone du projet constitue le jeu de données géoclimatiques. L'algorithme utilise ensuite un ensemble de données historiques sur les feux de forêt pour explorer les caractéristiques des zones couvertes par le feu dans le passé. L'objectif du modèle utilisé est de fournir une valeur de la propension à être traversé par le feu (pour chaque pixel), définie comme la susceptibilité au feu.

Pour ce faire, l'ensemble de données d'apprentissage et l'ensemble de données de test sont construits par échantillonnage aléatoire dans lequel 25% des points ont été utilisés comme ensemble de test, en gardant toujours à l'esprit que les deux ensembles de données (ensemble de données de test et ensemble de données d'apprentissage) sont équilibrés. Ils sont en fait constitués de 50% de points jamais détectés comme brûlés pour le jeu de données historiques utilisé, et des 50% restants de points correspondant à un événement de feu.

Le chapitre suivant présente les données utilisées pour extraire les variables d'entrée du modèle.

Données d'entrée.

Toutes les couches d'entrée suivront les caractéristiques du MNE telles que l'étendue, la résolution, la projection.

Toutes les couches d'entrée au format raster ont une résolution de 100 m et une projection EPSG:32632 UTM 32 N. Les données d'entrée au format vectoriel suivent la même projection.

Le tableau suivant présente les données d'entrée sélectionnées pour l'analyse de la susceptibilité aux feux de forêt de la zone MedStar, ainsi que les données d'entrée du modèle d'apprentissage automatique qui sera utilisé pour produire la carte de susceptibilité finale.

Les données d'entrée sélectionnées pour l'analyse sont les suivantes :

Dato di Input	Descrizione
land cover (CORINE 2018)	<i>Carta di copertura suolo CORINE 2018 al terzo livello di dettaglio</i>
dem	<i>Raster relativo alla quota (m)</i>
Aree NATURA 2000	<i>aree NATURA 2000 sull'area di progetto MedStar</i>
strade principali	<i>Shapefile relativo alle strade principali dell'area di progetto MedStar</i>
temperatura media giornaliera mondiale	<i>Dati di temperatura provenienti da copernicus E-OBS dal 1995 al 2020</i>
precipitazione cumulata giornaliera mondiale	<i>Dati di precipitazione provenienti da copernicus E-OBS dal 1995 al 2020</i>
incendi storici	<i>Dataset storico degli incendi proveniente da un merging tra i seguenti datasets: dataset francese (Provenza e Corsica) dal 1973 al 2020 dataset regione Liguria dal 1996 al 2019 dataset italiano (Toscana e Sardegna) dal 2007 al 2018 Al dataset finale è stata eseguita un'operazione di dissolve</i>

Les données d'entrée (caractéristiques) du modèle d'apprentissage automatique qui sont extraites des données ci-dessus sont les suivantes :

Input Modello ML	Descrizione
dem	<i>quota in metri</i>
slope	<i>pendenza</i>
east	<i>esposizione sul versante est</i>
north	<i>esposizione sul versante nord</i>
urban_d	<i>ogni pixel ha un valore relativo alla distanza dalle aree urbane (q estratte dalla CORINE 2018)</i>
crops_d	<i>ogni pixel ha un valore relativo alla distanza dalle aree coltivate (q estratte dalla CORINE 2018)</i>
roads_d	<i>ogni pixel ha un valore relativo alla distanza dalle strade principali</i>
temp_1	<i>temperatura media per la stagione invernale (Celsius)</i>
temp_2	<i>temperatura media per la stagione estiva (Celsius)</i>
prec_1	<i>precipitazione cumulata giornaliera media invernale (mm)</i>
prec_2	<i>precipitazione cumulata giornaliera media estiva (mm)</i>
park	<i>il valore di ogni pixel può essere 1 o 0 a seconda se appartiene ad un'area appartenente a NATURA 2000</i>
veg	<i>la variabile categorica relativa al tipo di vegetazione di ciascun pixel, estratta dalla CORINE 02018 al terzo livello di dettaglio</i>
perc_x	<i>la variabile continua relativa alla percentuale di vegetazione x nell'intorno del pixel in esame. Le percentuali di vegetazione sono riferite alla variabile veg sopra presentata.</i>

Détails sur les types de végétation variables (veg).

La carte d'occupation des sols CORINE 2018 a été utilisée pour extraire les variables de végétation catégorielles associées à chaque pixel de l'espace. Les classes considérées se

situent au troisième niveau de détail, et ont été principalement exclues les classes appartenant aux surfaces artificielles (code 1), aux zones humides (code 4) et aux plans d'eau (code 5), qui sont toujours considérées comme non brûlables. Les cales avec leurs codes corine associés qui ont été pris en compte dans l'analyse sont présentés ci-dessous.

Codice vegetazione	tipi	Descrizione
0		Area urbanizzate, non bruciabili
211		Seminativi in aree non irrigue
212		Seminativi in aree irrigue
213		Risaie
221		Vigneti
222		Frutteti e frutti minori
223		Oliveti
224		Altre colture permanenti
231		Prati stabili
241		Colture annuali associate a colture permanenti
242		Sistemi colturali e particellari complessi
243		Aree prevalentemente occupate da colture agrarie con presenza di spazi naturali importanti
244		Aree agroforestali
311		Boschi di latifoglie
312		Boschi di conifere
313		Foresta mista
321		Aree a pascolo naturale e praterie
322		Brughiere e cespuglieti
323		Aree a vegetazione sclerofilla
324		Aree a vegetazione boschiva e arbustiva in evoluzione
331		spiagge, dune
332		rocce nude
333		Aree con vegetazione rada
334		Aree percorse da incendi

Détail des données climatiques.

En ce qui concerne les données climatiques, les données quotidiennes de température et de précipitation ont été extraites en utilisant le jeu de données Copernicus (E-OBS) avec une couverture mondiale. En particulier, des informations sur la zone du projet ont été extraites et une moyenne des données quotidiennes relatives à la saisonnalité définie dans l'analyse a été calculée. Les données Copernicus ont une résolution d'environ 8 km et ont été

rééchantillonnées avec une interpolation (bilinéaire) à 100 m, avec la précaution d'insérer une valeur moyenne saisonnière dans les pixels sans données : un processus qui était nécessaire pour éviter l'exclusion de certains pixels avec toutes les autres informations disponibles, en particulier sur les îles. Il en résulte deux couches de températures pour les saisons d'hiver et d'été montrant la valeur moyenne de la température pour cette saison particulière et deux couches de précipitations cumulées quotidiennes dont la moyenne est calculée sur les saisons d'été et d'hiver.

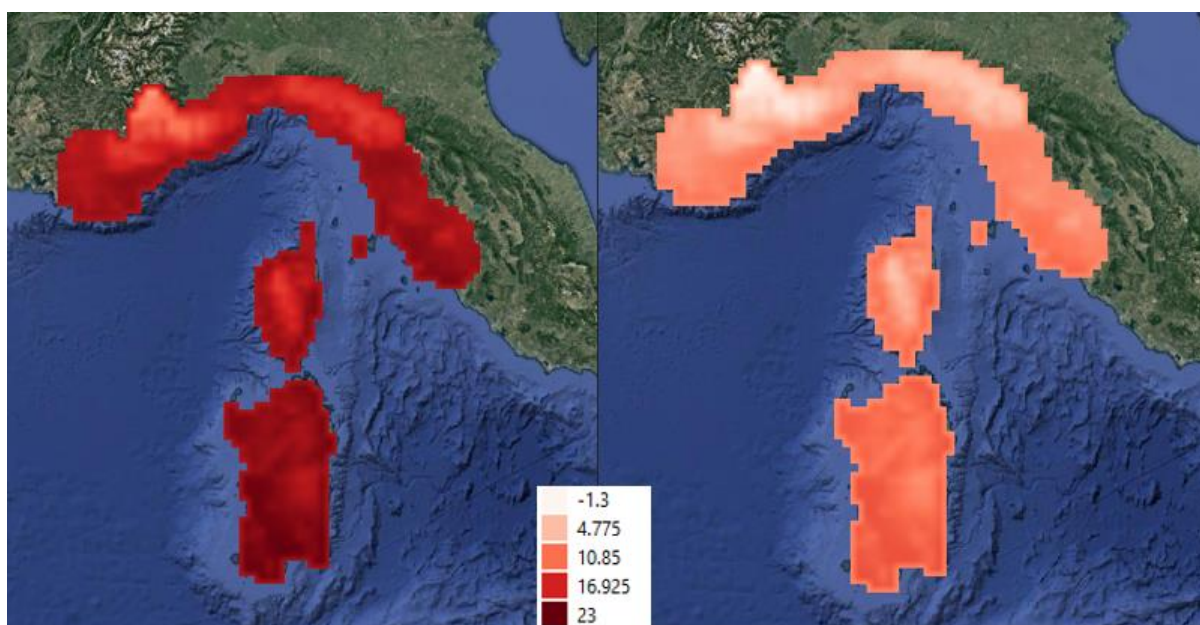


Figura 23: A gauche les températures estivales, à droite la couche de températures hivernales.

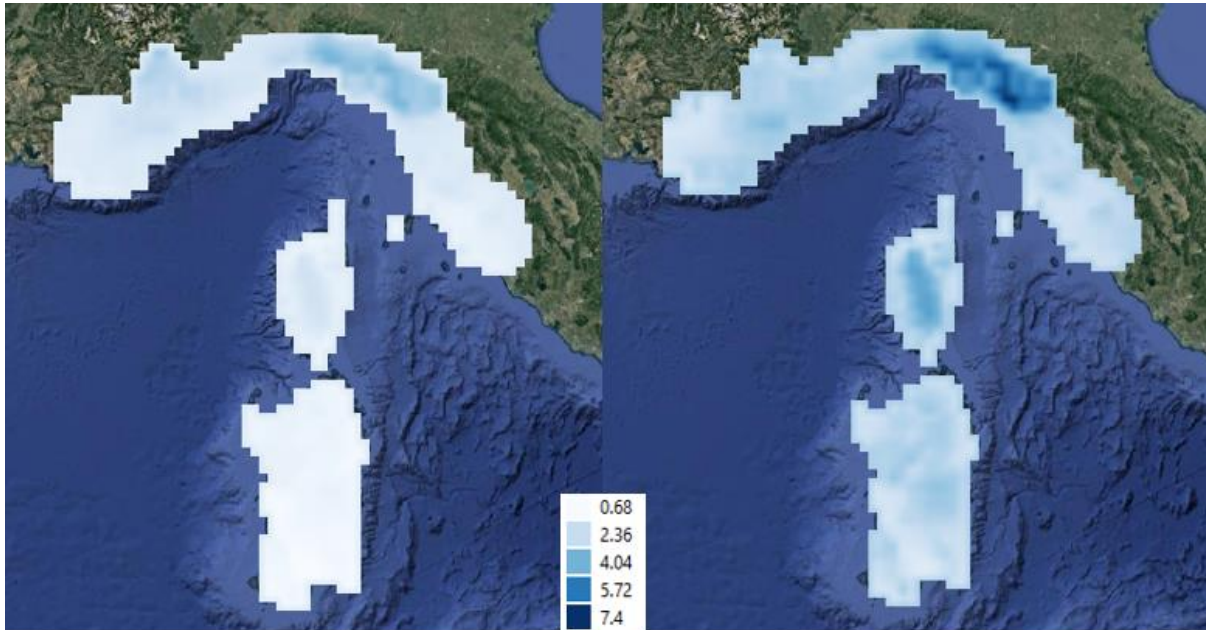


Figura 24: A gauche les précipitations estivales, à droite la couche de précipitations hivernales.

Détails de l'incendie

Le jeu de données des incendies historiques est d'une importance capitale pour le modèle d'apprentissage automatique à utiliser. En fait, chaque pixel de l'espace est associé à une information binaire concernant le passage d'un incendie pendant la fenêtre temporelle analysée, qui sera utilisée comme variable dépendante pour le modèle lui-même. Celle-ci sera d'abord utilisée dans l'ensemble de données d'entraînement, puis sera estimée par l'algorithme pour chaque point de la zone du projet.

Trois ensembles de données historiques sur les incendies sont disponibles en format shapefile dans la zone d'étude.

Ensemble de données françaises (Provence et Corse) de 1973 à 2020

Jeu de données de la région Ligurie de 1996 à 2019

Ensemble de données italiennes (Toscane et Sardaigne) de 2007 à 2018

Ceux-ci ont été fusionnés par une opération de fusion et ensuite dissous par une opération de dissolution.

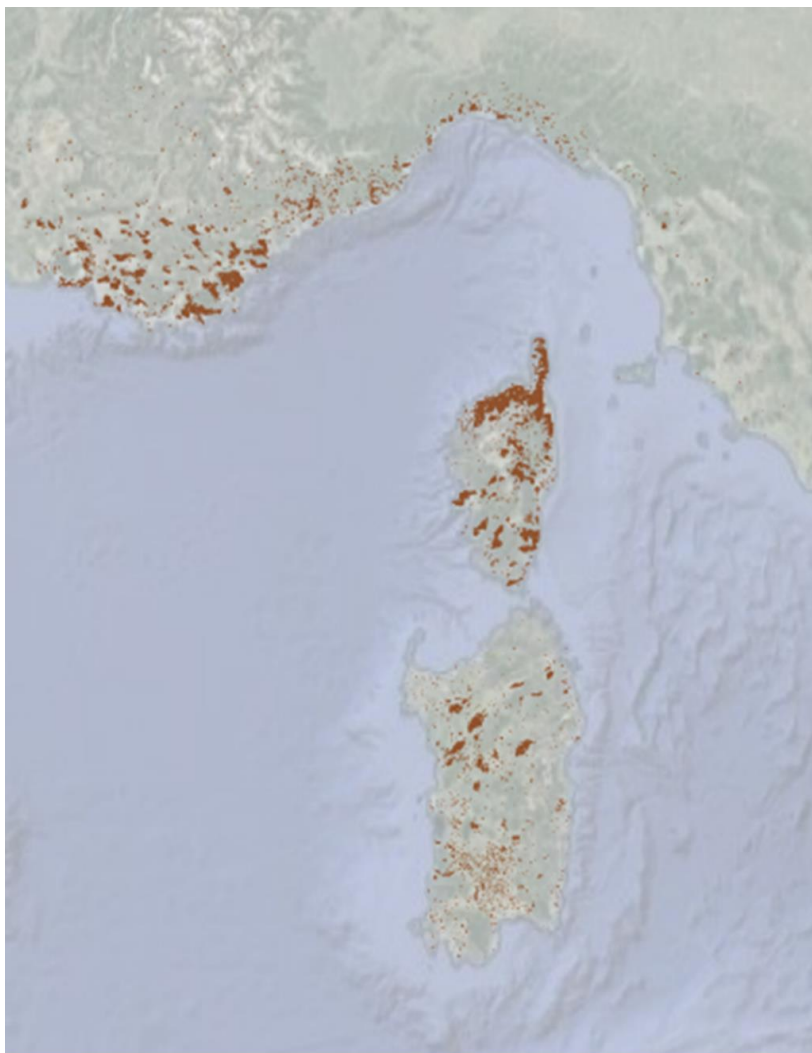


Figura 25: Historique des incendies après opération de fusion et dissolution sur les 3 jeux de données décrits.

Dans ce contexte, l'information sur la fréquence des feux relative à chaque pixel est perdue, mais l'ensemble du périmètre des zones brûlées disponible dans les différents jeux de données est pris en compte. Les polygones qui se chevauchent sont en fait fusionnés en un seul polygone. Cette opération est réalisée dans le but de donner moins d'importance aux incendies récurrents sur les mêmes zones, qui sont souvent dus à des causes anthropiques attribuables au renouvellement des pâturages.

Cartes de susceptibilité.

Dans ce chapitre sont présentées les cartes de susceptibilité saisonnière sur la zone d'étude MedStar résultant du modèle d'apprentissage automatique. Chaque carte est associée à 3 graphiques d'importance des variables d'entrée : les importances générales de chaque

variable, les importances des variables catégorielles de végétation, les importances des variables de voisinage (pourcentage de végétation autour de chaque pixel correspondant à une fenêtre de 5x5 pixels). Les importances extraites montrent l'importance de chaque variable donnée dans la détermination de la sortie du modèle, soit positive (le pixel sera traversé par un incendie), soit négative (le pixel ne sera pas traversé par un incendie). Les cartes de susceptibilité d'été et d'hiver et les histogrammes de l'importance des variables sont présentés ci-dessous.

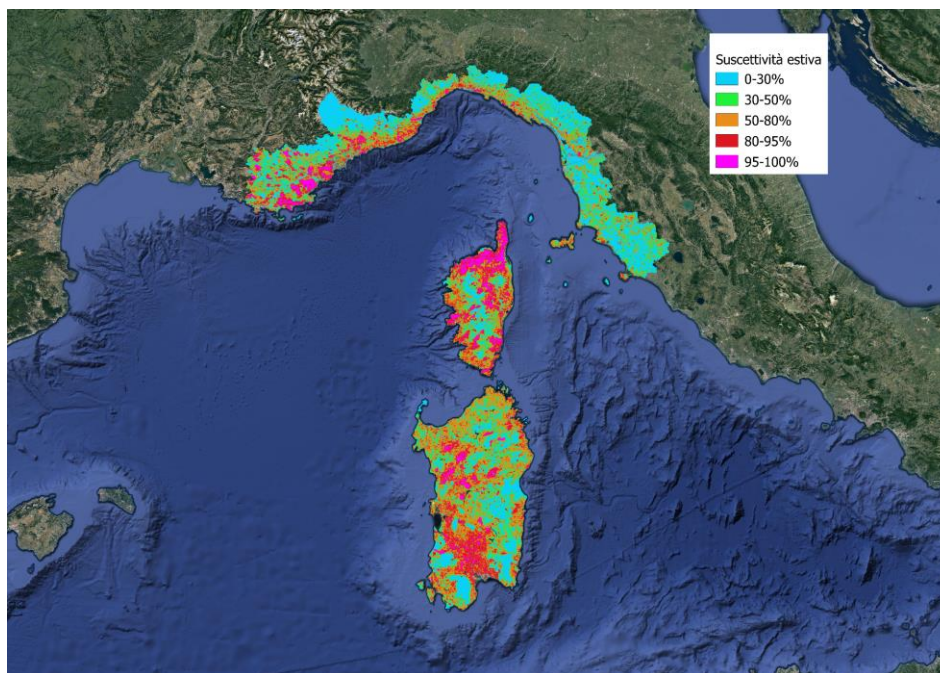


Figura 26: Carte de la susceptibilité estivale.

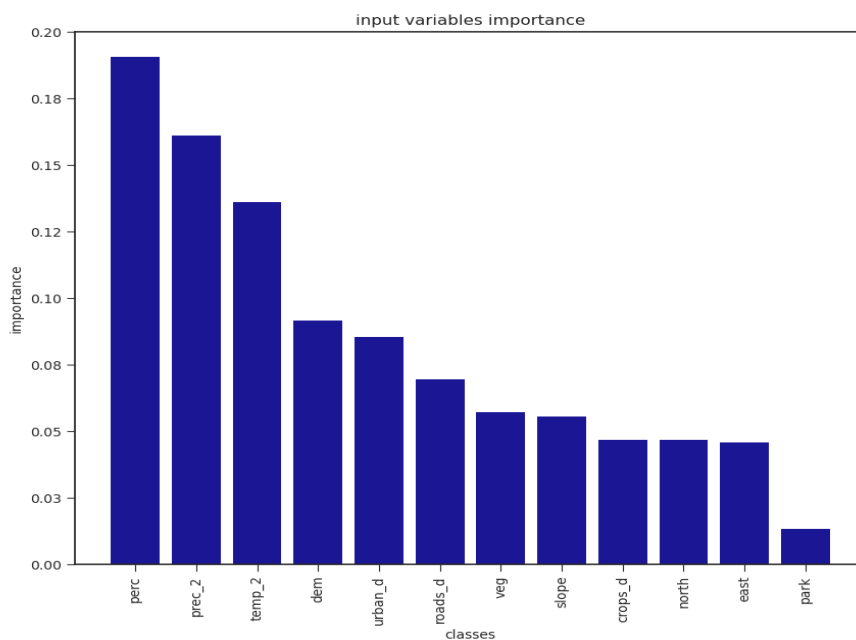


Figura 27: Histogramme des importations normalisées des variables d'entrée du modèle ML pour la saison estivale : des plus influentes aux moins influentes, les différentes perc_x additionnées, les variables climatiques, l'altitude, les distances des routes et des zones urbanisées, la végétation et enfin les variables d'exposition.

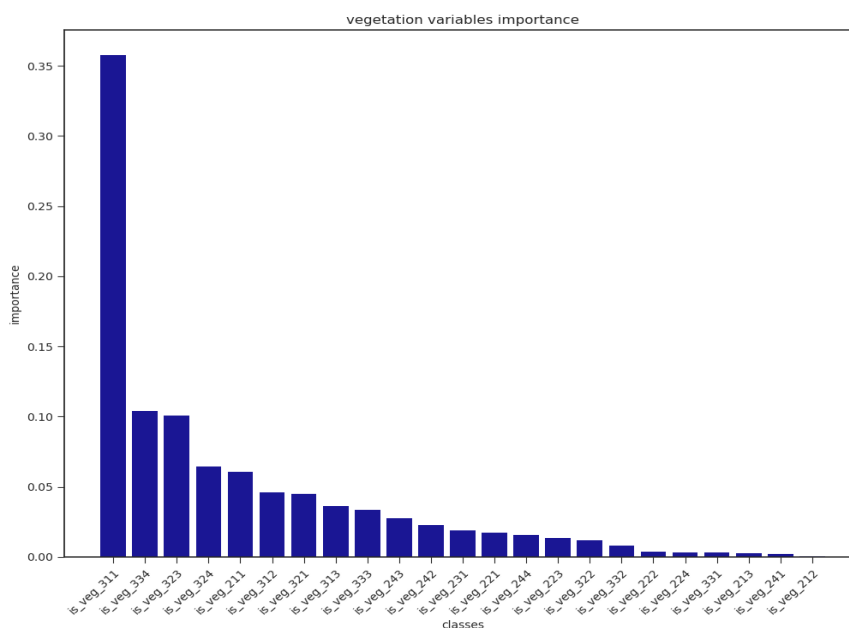


Figura 28: Histogramme des importations des variables de végétation d'entrée du modèle ML pour la saison estivale. Ces variables correspondent à la végétation dans chaque pixel et chaque valeur d'importance est normalisée par rapport à l'importance de la variable végétale (figure précédente)

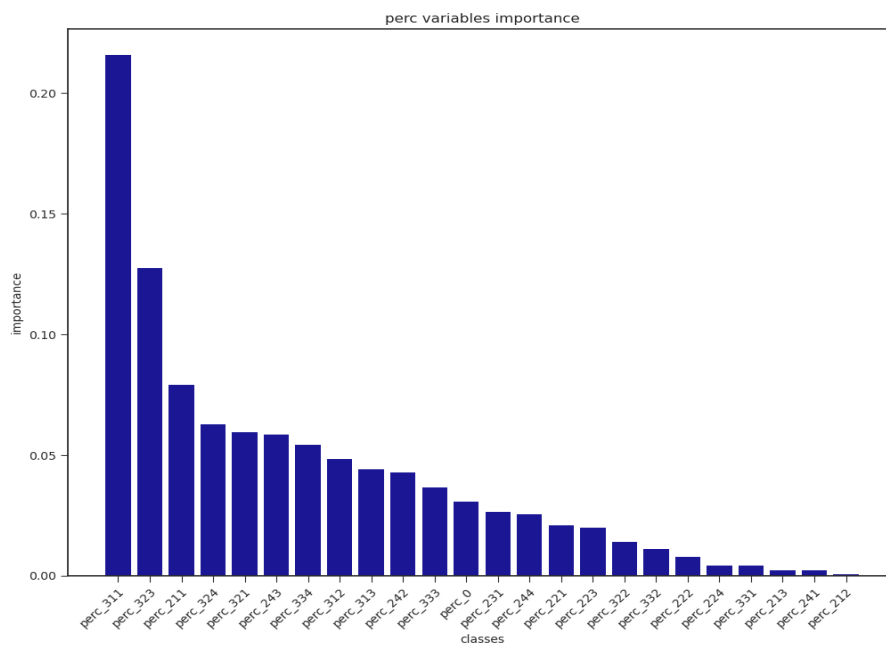


Figura 29: Histogramme des importations de variables de végétation de voisinage en entrée du modèle ML pour la saison estivale. Ces variables correspondent au pourcentage de végétation dans un intérieur 5x5 pour chaque pixel, et chaque valeur d'importance est normalisée à l'importance de la variable perc.

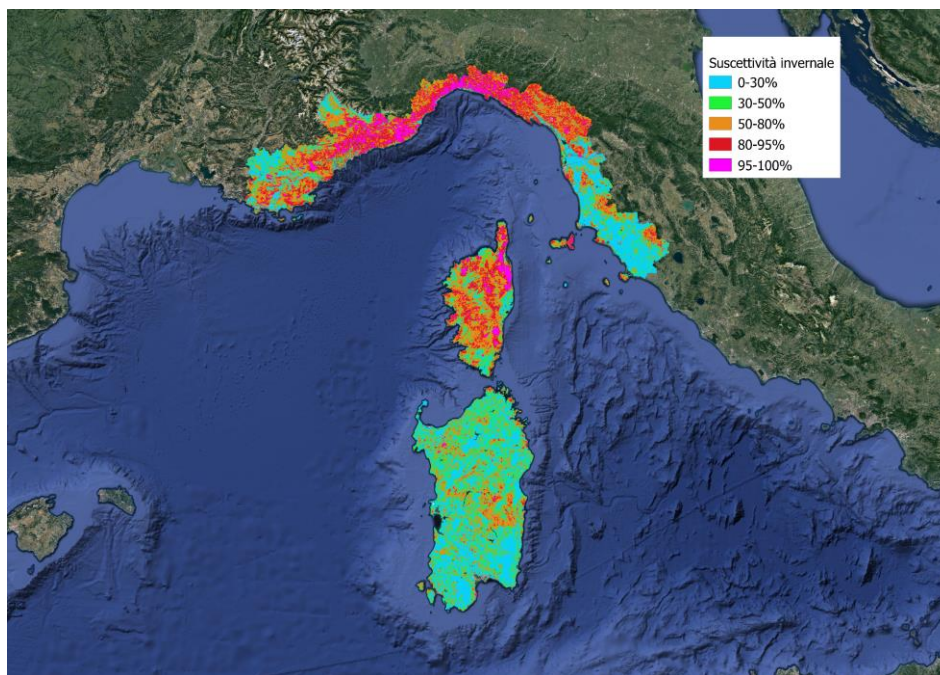


Figura 30: Carte de la susceptibilité hivernale.



Interreg



UNION EUROPÉENNE
UNIONE EUROPEA

MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fonds européen de développement régional
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



MED-Star

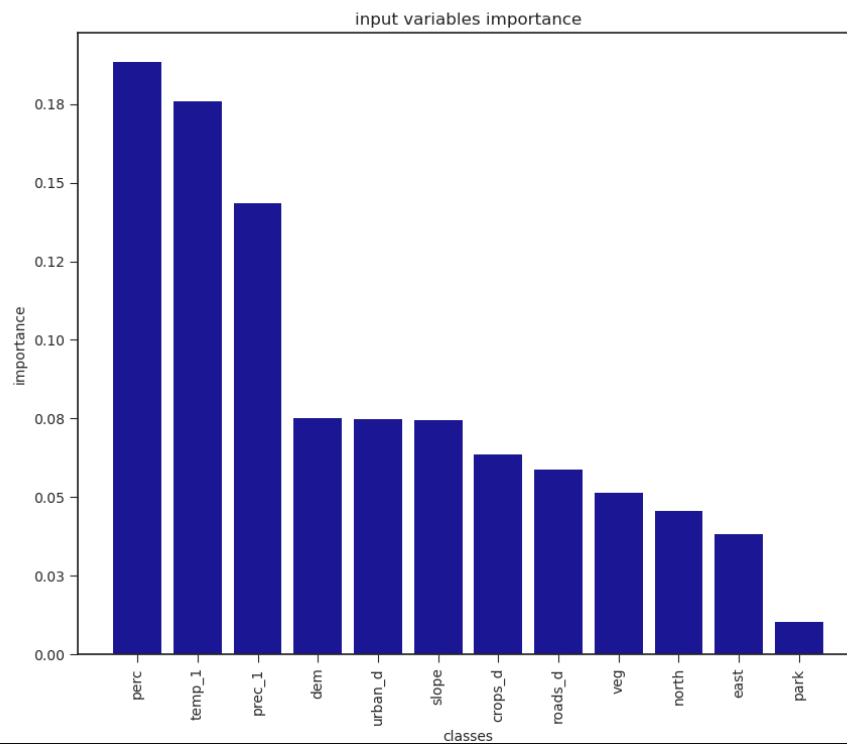


Figura 31: Histogramme des importations normalisées des variables d'entrée du modèle ML pour la saison hivernale : du plus influent au moins influent, les différentes perc_x résumées, les variables climatiques, l'altitude et la pente, les distances des routes et des zones urbanisées, la végétation et enfin les variables d'exposition.

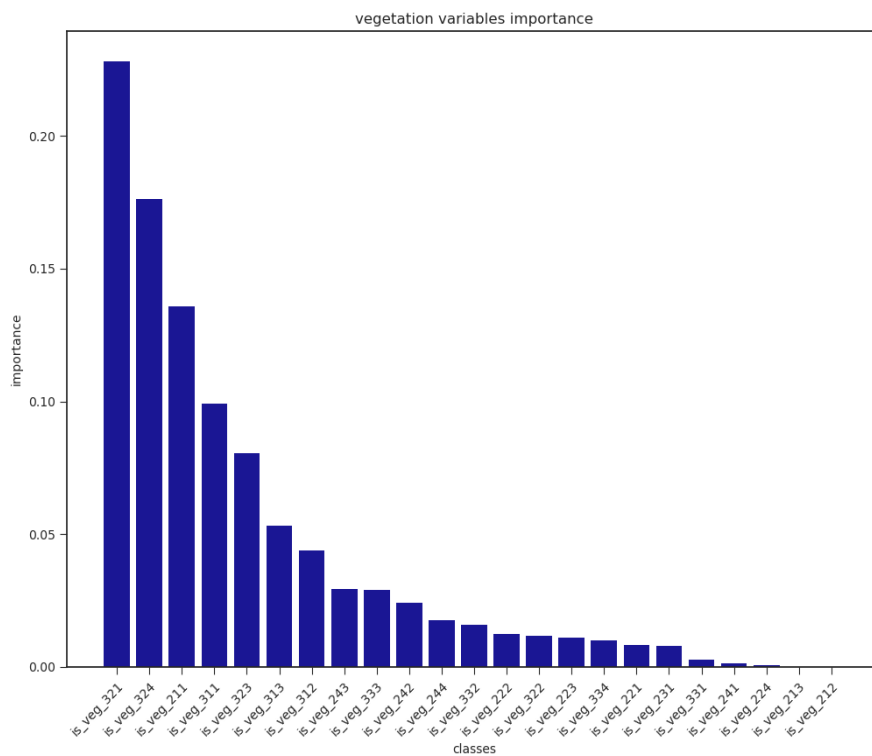


Figura 32: Histogramme des importations des variables de végétation d'entrée du modèle ML pour la saison hivernale. Ces variables correspondent à la végétation dans chaque pixel et chaque valeur d'importance est normalisée par rapport à l'importance de la variable végétale (figure précédente)

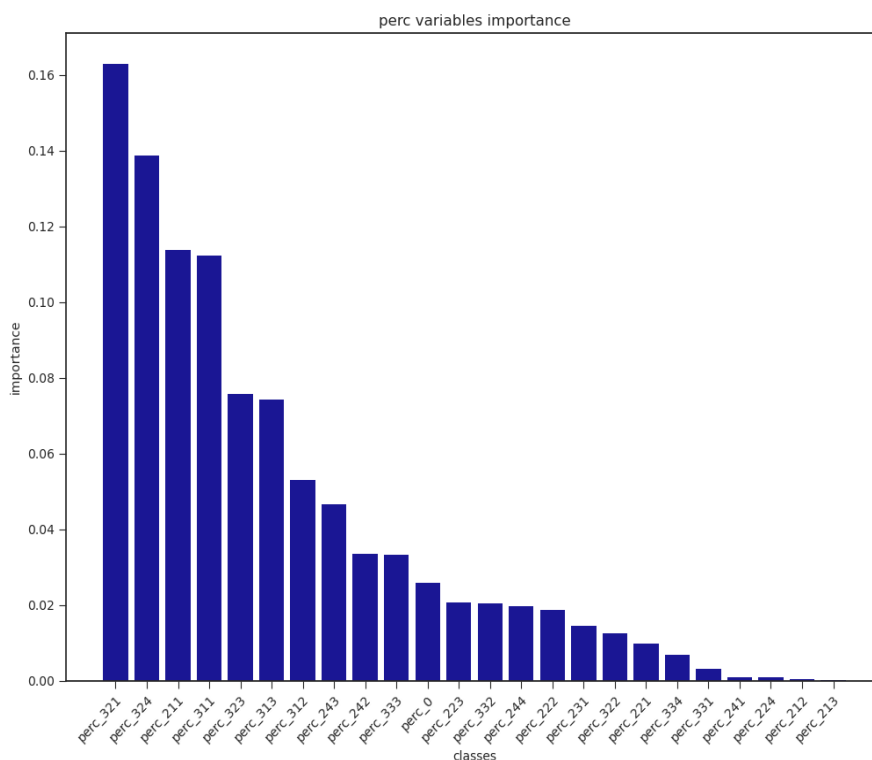


Figura 33: Histogramme de l'importance des variables de végétation du voisinage en entrée du modèle ML pour la saison hivernale. Ces variables correspondent au pourcentage de végétation dans un intérieur 5x5 pour chaque pixel, et chaque valeur d'importance est normalisée à l'importance de la variable perc.

Comme on peut le voir sur les graphiques ci-dessus, la variable d'occupation du sol se référant aux classes de végétation du voisinage (perc) est considérée comme plus importante que les types de végétation individuels associés à un seul pixel (veg) et est également la variable la plus importante pour l'algorithme de forêt aléatoire. Les couches climatiques des précipitations et de la température suivent en importance, puis les variables d'altitude et de pente, la distance aux routes et aux zones urbaines, et les variables d'exposition.

En ce qui concerne les variables de végétation les plus importantes, pour la saison d'été, les feuillus, les sclérophylles et les terres arables dans les zones non irriguées (respectivement 311 323 211) sont les plus importants, tandis que pour la saison d'hiver, les variables les plus importantes sont les zones de pâturage naturel, les zones de végétation forestière arbustive, les terres arables dans les zones non irriguées et les feuillus (respectivement 321 324 211 311).

Indicateurs de performance.

Dans cette section, plusieurs indicateurs de performance liés aux résultats du modèle dans la production des cartes de susceptibilité sont analysés. En particulier, un ensemble de données de test a été sélectionné, contenant environ 25% du total des points utilisés pour définir les ensembles de données de formation et de test. Ces points n'ont jamais été utilisés par l'algorithme dans la phase d'apprentissage, les résultats de l'algorithme à ces points sont comparés à la véritable étiquette pour extraire les résultats de performance tels que ROC AUC (surface sous la courbe), MSE (erreur quadratique moyenne) et la précision globale.

la saison d'été :

AUC : 0,98
 EQM : 0,062
 précision : 0,93

la saison d'hiver :

AUC : 0,98
 EQM : 0,051
 précision : 0,94

L'AUC est dérivée du calcul de l'aire sous la courbe ROC, qui est présentée pour les deux saisons dans l'image suivante :

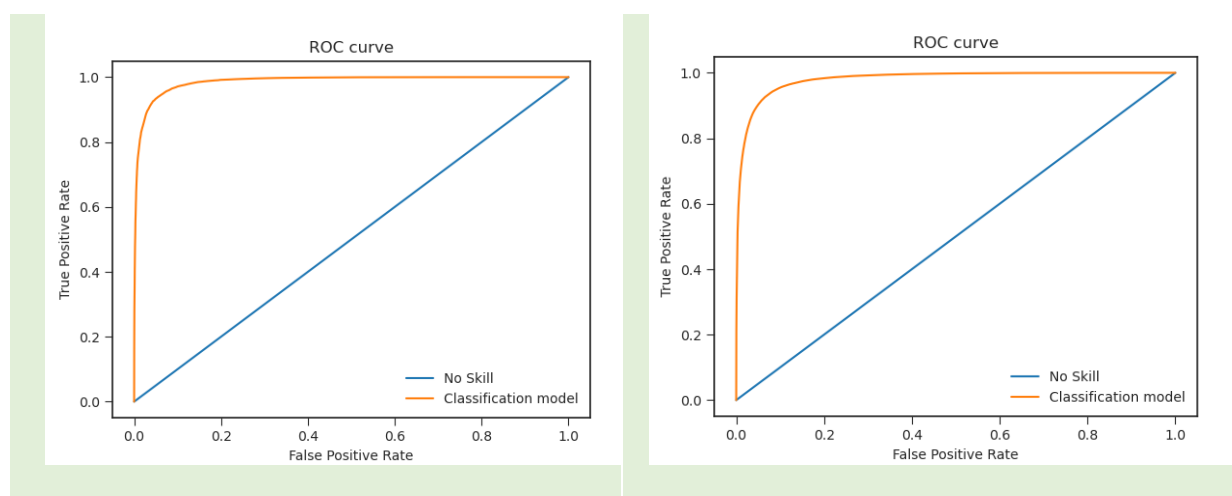


Figura 34: Courbe d'analyse d'hiver (à gauche) et d'été (à droite).

MSE, l'erreur quadratique moyenne est plutôt définie comme :

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2$$

MSE = mean squared error

n = number of data points

Y_i = observed values

Ŷ_i = predicted values

où, dans ce cas précis, *n* désigne le nombre de pixels utilisés dans l'ensemble de données de test, *Y_i* représente la valeur de sortie observée discrète (0 si le point n'était pas net, 1 s'il était net) et représente la valeur de susceptibilité (continue) estimée par l'algorithme.

Enfin, la valeur de la précision globale entre la sortie observée et la sortie calculée par l'algorithme (cette fois-ci toutes deux discrètes) est calculée comme le rapport entre le nombre de pixels de test correctement classés et le nombre de pixels de test.

L'image suivante montre la matrice de confusion pour les analyses saisonnières conduisant à ce résultat de précision.

Figura SEQ Figura 1* ARABIC35: Matrices de confusion pour les analyses saisonnières.

a sinistra, la matrice di confusione relativa all'analisi invernale, a destra quella relativa all'analisi estiva

I valori ottenuti mostrano che il modello costruito è molto accurato, i pixel riferiti al dataset di test, sono classificati con pochissimo margine di errore dal modello di machine learning: il valore elevato dell'indicatore AUC sottolinea come i *True positive* (pixel classificati come bruciati che sono effettivamente bruciati) siano alti e, allo stesso tempo, i *False positive* (pixel classificati come bruciati ma non lo erano da osservazione) siano bassi. Il valore basso di MSE, invece, mostra come la differenza tra il valore di output osservato e il valore di output probabilistico fornito sia accettabile.

Analyse de la distribution de la susceptibilité.

Ce chapitre présente deux types d'analyses effectuées sur les cartes de susceptibilité saisonnière relatives au calcul de la distribution de la susceptibilité à la fois dans les zones brûlées et dans les zones présentant un certain type de végétation.

Tout d'abord, la distribution de la susceptibilité au sein des zones brûlées utilisées dans l'ensemble de données de test a été calculée. En particulier, les valeurs de susceptibilité ont été regroupées en différentes classes définies par les percentiles déjà vus pour définir la palette des cartes de susceptibilité :

- 0 - 30
- 30 - 50
- 50 - 85
- 85 - 95
- 95 - 100

L'histogramme résultant montre la distribution en pourcentage des pixels brûlés regroupés par classe de susceptibilité pour les cartes d'été et d'hiver.

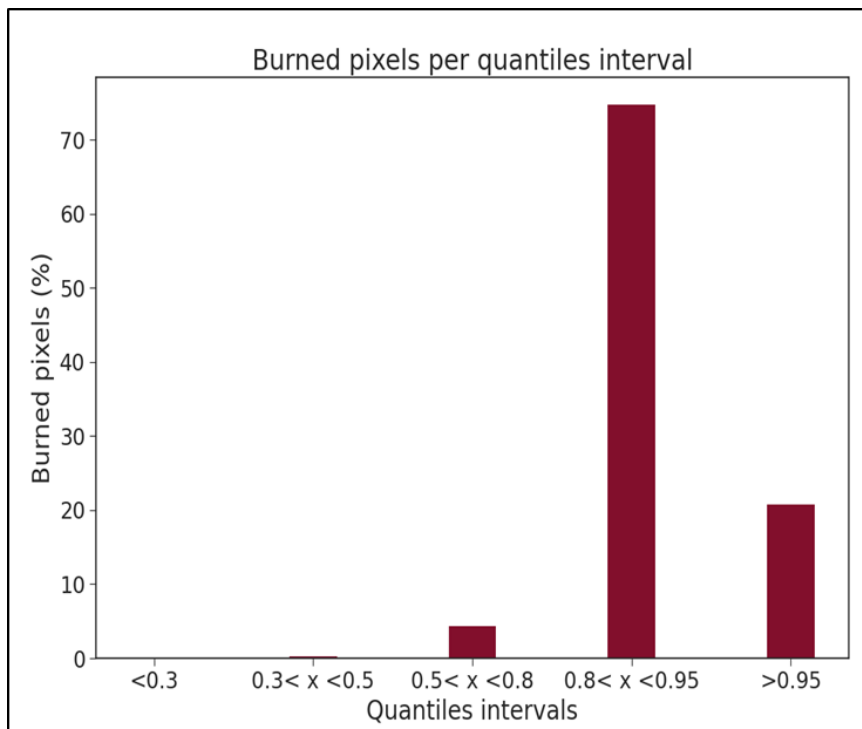


Figura 36: Distribution en pourcentage des pixels gravés dans l'ensemble de données de test de l'algorithme d'apprentissage automatique regroupées en diverses classes de susceptibilité aux cartes d'été

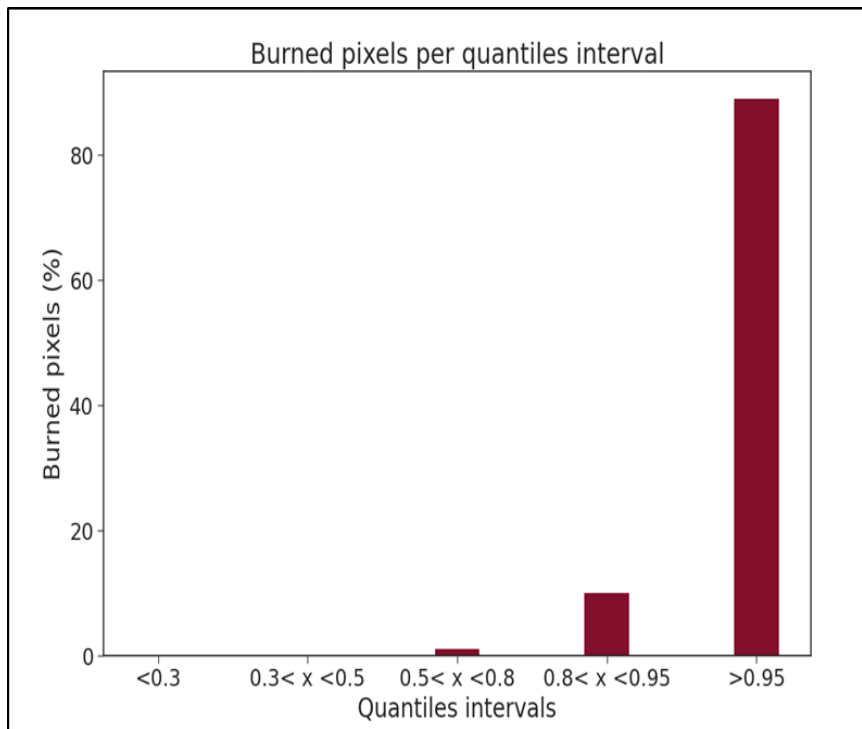


Figura 37: Distribution en pourcentage des pixels brûlés dans l'ensemble de données de test de l'algorithme d'apprentissage automatique regroupées en différentes classes de susceptibilité aux cartes hivernales

Cette analyse est utile pour définir la précision générale de la carte produite ; en effet, presque tous les pixels des zones brûlées qui font partie de l'ensemble de données de test du modèle (n'appartenant donc pas à l'ensemble de données utilisé pour entraîner l'algorithme) se trouvent sur des parties de la carte produite avec des valeurs de susceptibilité supérieures au 80e percentile dans le cas de l'été et supérieures à 95 % dans le cas de l'hiver.

Une deuxième analyse concerne la distribution de la susceptibilité au sein des classes de végétation considérées comme les plus importantes par l'algorithme d'apprentissage automatique.

Ces histogrammes sont utiles pour comprendre si une classe de végétation est importante pour l'algorithme pour classer un point comme 0 (non soumis au passage du feu) ou 1 (soumis au passage du feu) car l'histogramme des susceptibilités lui-même ne discrimine pas entre les 2 cas.

Les classes de végétation suivantes ont été analysées :

pour la saison d'hiver : 311, 211, 321, 324 (arbres à feuilles larges, terres arables dans les zones non irriguées, zones de pâturage naturel, zones avec une végétation de bois d'arbustes)

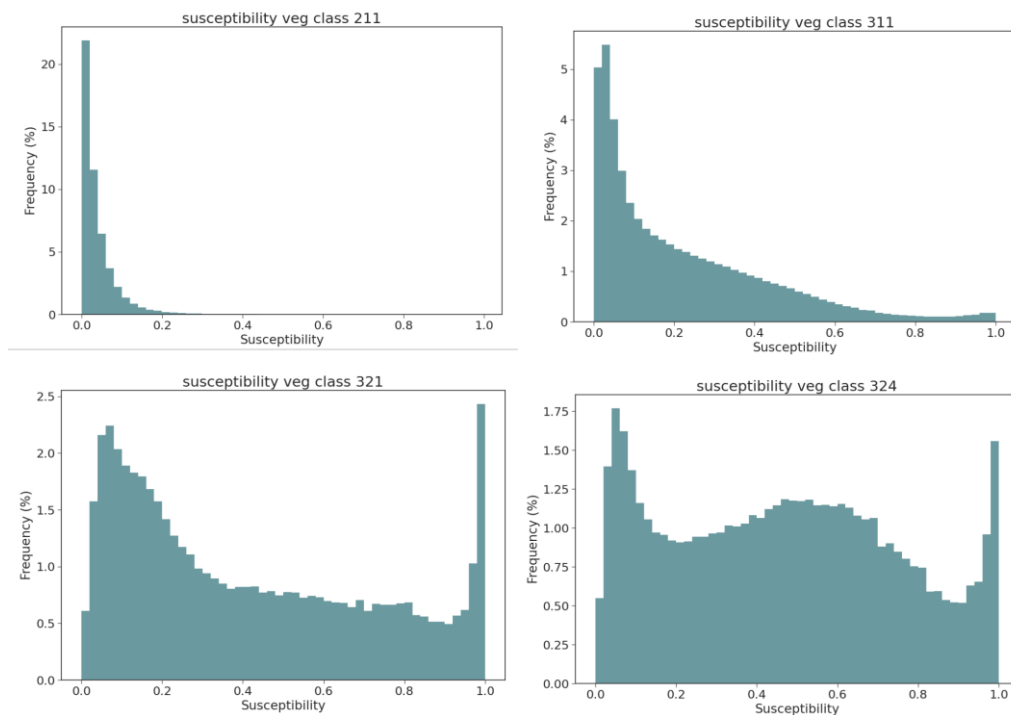


Figura 38: répartition de la sensibilité au sein des 4 classes de végétation les plus importantes pour produire la carte hivernale. En haut à gauche, terres arables en zones non irriguées à très faible sensibilité, en bas à gauche, zones de pâturages naturels, caractérisées par une sensibilité moyenne, en haut à droite, feuillus peu sujets au feu. Enfin, en bas à droite, des zones à végétation ligneuse arbustive où certaines zones sont peu enclines au passage du feu tandis que d'autres sont très inclinées.

pour la saison estivale : 311, 323, 324 (feuillus, sclérophylles, zones de pâturages naturels, zones boisées arbustives)

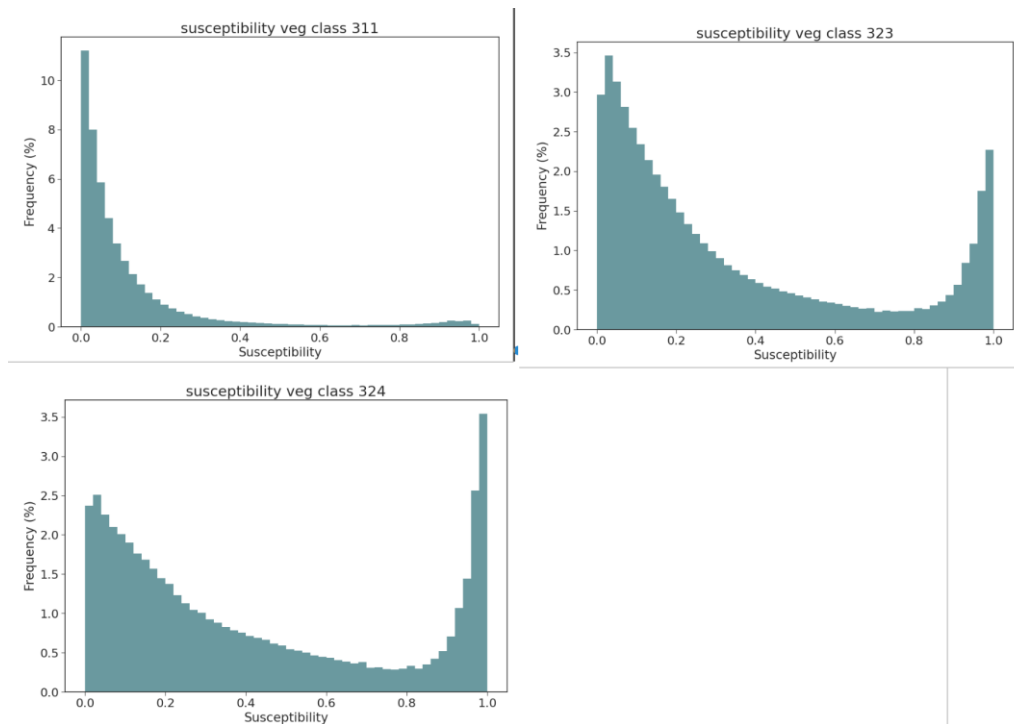


Figura 39: répartition de la sensibilité au sein des 3 classes de végétation les plus importantes pour produire la carte d'été. En haut à gauche les arbres à feuilles caduques, comme dans la saison hivernale à faible sensibilité, en bas à gauche les zones à végétation arbustive ligneuse montrant les zones à forte sensibilité et d'autres moins sujettes au passage du feu, enfin en haut à droite les zones de pâturage naturel, avec une tendance similaire aux zones arbustives mais en moyenne avec une sensibilité moindre.

Proposition de révision des zones de danger d'incendie de forêt.

Introduction.

La Protection Civile de la Région Sardaigne, en collaboration avec l'ARPA Sardegna, a jugé opportun de réviser les zones d'alerte utilisées au cours des 6 dernières années, jusqu'à la campagne de lutte active de 2021. Les modifications ont été apportées dans le but de renforcer l'efficacité du "code couleur" des bulletins de danger, au profit de l'ensemble du système de protection civile et de la population, notamment en ce qui concerne les mesures à mettre en place pour la prévention des incendies de forêt afin de sauvegarder le patrimoine forestier et de protéger l'intégrité de la vie.

Méthodologie adoptée.

Les 26 zones d'alerte utilisées jusqu'à présent par le Centre fonctionnel décentralisé pour prévoir le danger d'allumage et de propagation des feux de forêt, sont officiellement en vigueur depuis la campagne de lutte contre les incendies 2016, après une période d'expérimentation interne d'un an commencée à l'été 2015. Auparavant, l'évaluation des risques était effectuée sur une base purement administrative, en prenant comme référence les territoires des huit provinces régionales.

Depuis 2016, il est possible d'opérer de manière plus détaillée, car les 26 zones, par rapport aux huit précédentes, se caractérisent par une plus grande uniformité du territoire en ce qui concerne les conditions prédisposant aux incendies (caractéristiques climatiques, géomorphologiques et de végétation) et accessoirement sur les aspects technico-administratifs.

Au cours des six dernières campagnes de lutte contre les incendies, il a été possible de vérifier quelles améliorations pouvaient être apportées aux zones d'alerte.

En tant que méthode, en général, la refonte proposée a été effectuée avec la fusion de certaines zones d'alerte et/ou avec la re-régulation d'autres zones en déplaçant certaines municipalités d'une zone à l'autre.

En particulier, l'expérience directe du CFD et l'étude des données statistiques des six dernières campagnes de l'AIB, ont mis en évidence l'opportunité de prioriser les repérimétrages qui ont concerné

la partie nord-est de la Sardaigne (zones C et D)

la zone centrale de la Sardaigne (zones M et N)

la zone de l'Oristanais (zones L et S) ;

le Sulcis Iglesiente (zones X, U et Z)

Ogliastra (zones T, Q et O).

En ce qui concerne la fusion de certaines zones d'alerte, l'analyse statistique des attributions de codes de couleur dans le temps a également été utile. Cela a permis d'identifier les zones voisines pour lesquelles, dans l'ensemble, l'évaluation du danger était identique pour des valeurs de l'ordre de 90% des jours (par exemple, les zones H et J ont une correspondance de 93%).

Cette révision a également permis de réduire le nombre de communes dont le territoire se trouve dans plusieurs zones d'alerte, ce qui présente les avantages suivants

simplifier la lecture des bulletins de prévision des risques par les institutions impliquées dans la lutte active, dans le contrôle du territoire, par les citoyens, etc ;

assurer une plus grande efficacité dans l'application des comportements pour lutter contre les actions et les manquements aux obligations qui peuvent conduire, même potentiellement, à des départs d'incendie ;

permettre une application plus correcte des actions préventives de la part de la population locale ainsi que l'application correcte d'éventuelles sanctions, étant donné que les limites des zones sont liées au cadastre comme le suggère l'expérience des institutions ayant diverses responsabilités dans les actions de prévention et de lutte contre les incendies de forêt.

Le paragraphe suivant détaille les nouvelles zones proposées et les raisons qui ont conduit à la proposition de leur redéfinition.

Les zones redéfinies se sont vues attribuer les anciens acronymes, à l'exception des zones H et J, désormais fusionnées, qui se sont vues attribuer l'acronyme H, ce qui porte les zones d'alerte de 26 à 25.

Détermination de nouvelles zones.

Révision des zones C et D

Afin d'améliorer l'homogénéité météorologique, il est proposé d'apporter des modifications aux zones C et D. Au cours des années où le CFD a été actif, il a en effet été constaté que la partie la plus septentrionale de la zone D est plus exposée aux vents des secteurs nord (en particulier de l'ouest et du nord-ouest) que la zone sud.

Cette partie nord, plus exposée, concerne les territoires des municipalités de Santa Teresa di Gallura, La Maddalena, Palau et Arzachena. Pour cette portion du territoire considéré, dans les cas où le facteur vent est déterminant pour l'aléa, la partie nord de la zone D en termes d'aléa est similaire à la zone C et supérieure à la partie sud de la zone D elle-même. Dans les cas où, en revanche, la température est une variable clé dans l'évaluation du danger, il y a eu de nombreux jours où le danger aurait pu être évalué comme plus important dans la partie sud que dans la partie nord de la zone D et de la zone C.

Pour les raisons susmentionnées, les municipalités de Santa Teresa di Gallura, La Maddalena, Palau et Arzachena sont déplacées de la zone D à la zone C.



Figura 40: Limite de zone C-D actuelle.

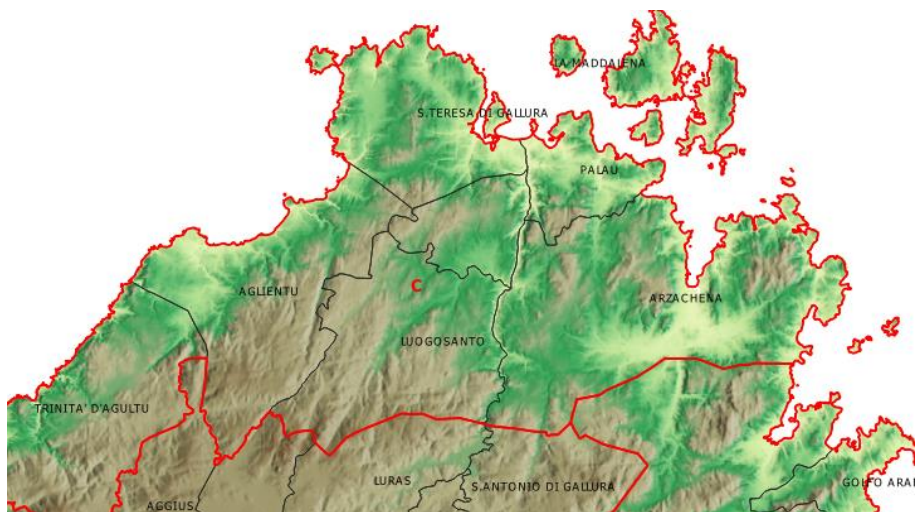


Figura 41: Limite de zone C-D redéfinie.

Révision des zones M et N.

Les communes de Teti, Austis et Sorgono, qui présentent des caractéristiques plutôt collinaires que montagneuses, sont séparées de la zone N, qui comprend le Gennargentu, et incluses dans la zone M, plus chaude.



Figura 42: Limite de zone M-N actuelle.



Figura 43: Limite de zone M-N redéfinie.

Révision des zones H et J

Les zones H et J ont des caractéristiques très similaires d'un point de vue morphologique et végétatif. Les zones de plaine (la plaine d'Ottana dans la zone J et la plaine d'Ozieri dans la zone H) sont caractérisées par des températures élevées et une faible humidité relative, qui donnent lieu à un facteur de danger plus important que les zones montagneuses correspondantes, qui subissent indirectement l'attribution d'un code couleur généralement plus élevé.

L'analyse statistique de l'attribution du code couleur des zones H et J, qui s'est avérée coïncider à 93 % tous les jours au cours des six années de prévision, suggère également que les deux zones devraient être fusionnées. Sur la base des raisons ci-dessus, il est considéré comme raisonnable de fusionner les zones H et J actuelles.

En outre, avec la fusion, pour pas moins de 9 municipalités (Illorai, Esporlatu, Burgos, Bottida, Bono, Anela, Bultei, Pattada et Budduso) le territoire tombera dans une seule zone d'alerte au lieu de deux, avec les avantages signalés dans le paragraphe précédent dans lequel la méthodologie adoptée a été décrite.

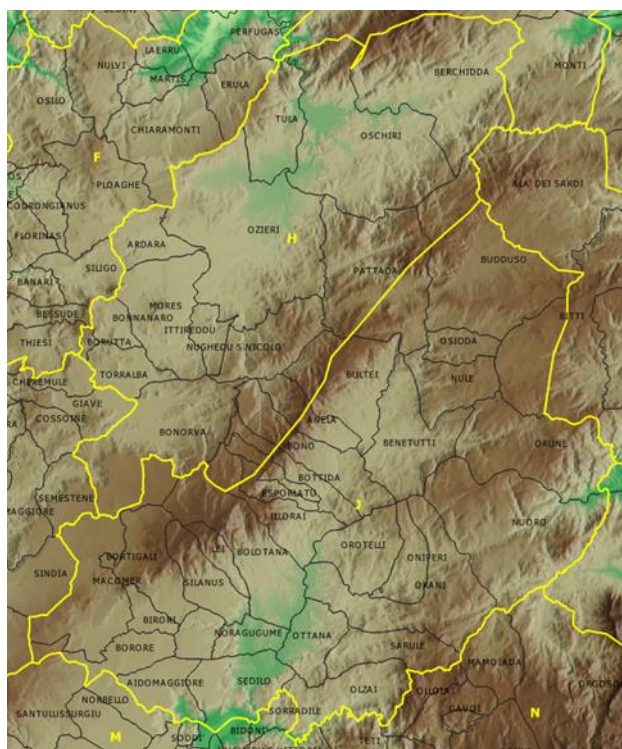


Figura 44: Limite de zone H-J actuelle.



Interreg



UNION EUROPEENNE
UNIONE EUROPEA

MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fonds européen de développement régional
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



MED-Star

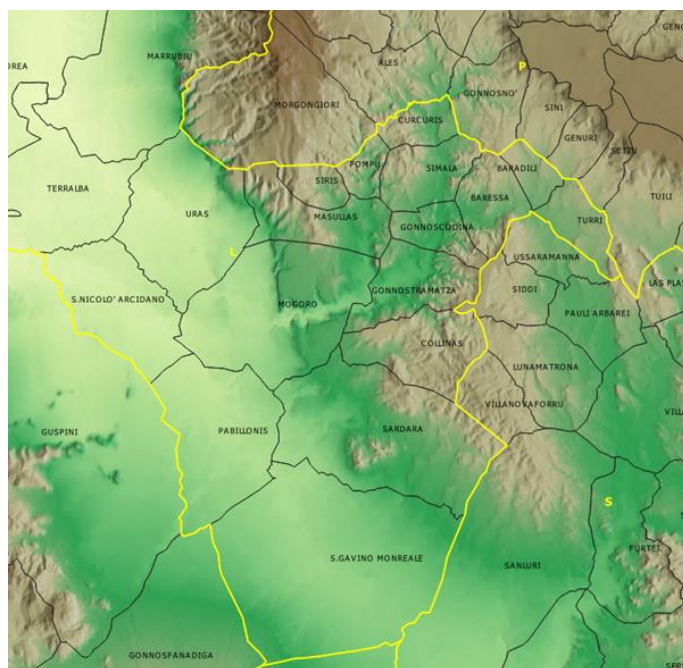


Figura 46: Limite de zone L-S actuelle.

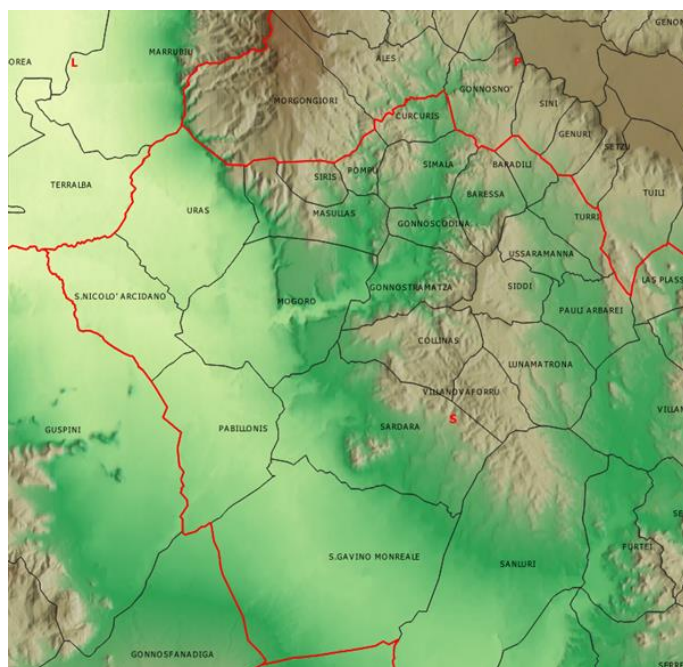


Figura 47: Limite de zone L-S redéfinie.

Révision des zones X et Z.

La partie sud-est de la municipalité de Teulada, et donc le territoire jusqu'à Capo Spartivento, y compris l'île administrative de Domus de Maria, est plus exposée au mistral que le reste du territoire de la zone Z, de sorte qu'il est jugé approprié de l'inclure dans la zone X, qui présente des caractéristiques similaires. Cela a également permis d'atteindre l'objectif de réunir le territoire municipal de Teulada, plus côtier, dans une seule zone (X), tandis que la partie montagneuse reste dans la zone Y.

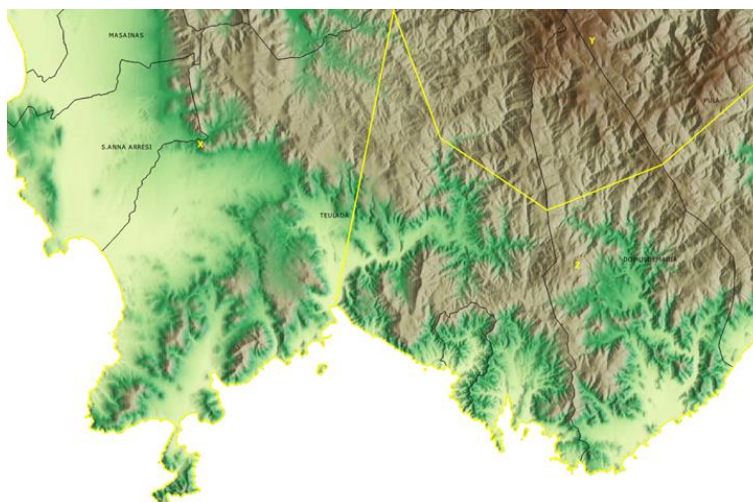


Figura 48: Limite de zone X-Z actuelle.

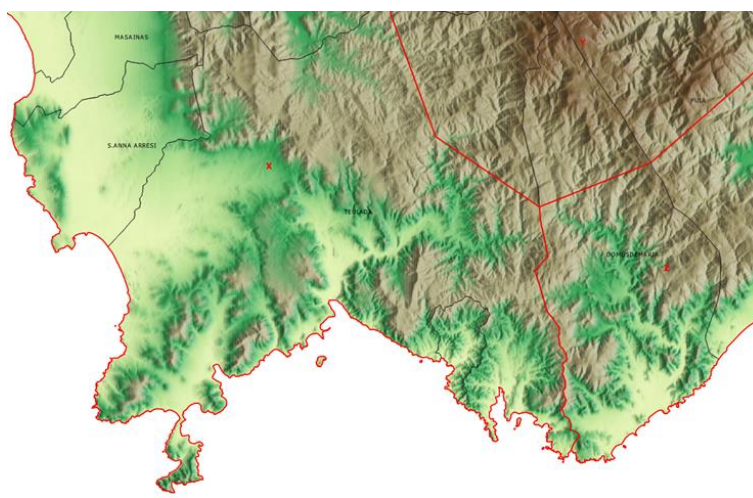


Figura 49: Limite de zone X-Z redéfinie.

Révision des zones U et V.

Les communes de Vallermosa et Siliqua (actuelle zone V) sont caractérisées par des températures élevées, tout comme les communes de Musei, Villamassargia, Domusnovas et Iglesias (actuelle zone U). De plus, elles ont une exposition similaire aux vents dominants : elles sont toutes bien exposées au Sirocco et peu affectées par le Mistral, car elles sont sous le vent du massif des Linas. Les communes de Vallermosa et de Siliqua sont donc considérées comme passant de la zone V à la zone U.

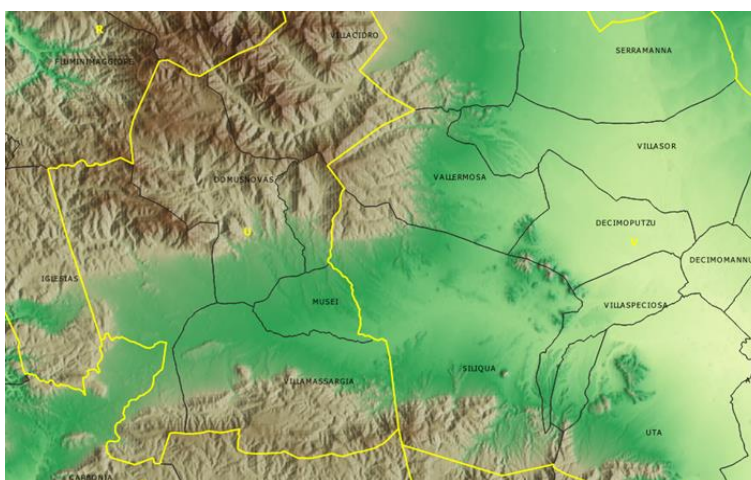


Figura 50: Limite actuelle de la zone UV.

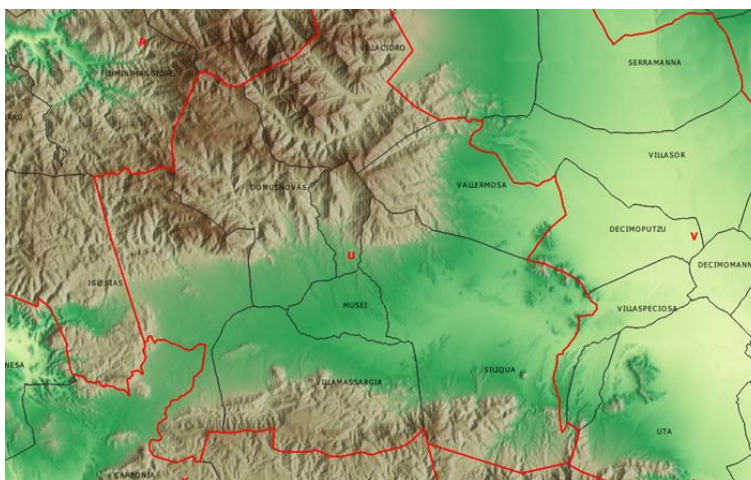


Figura 51: Limite de zone U-V redéfinie.

Révision des zones T, O et Q.

On considère que le territoire de la commune de Perdasdefogu est déplacé de la zone T à la zone Q car, comme l'expérience des 6 dernières années l'a montré, il est moins influencé par la mer, ce qui est une caractéristique typique des communes de la zone T, à l'inverse son climat est plus proche des communes d'Escalaplano et d'Orroli.

La partie nord du T, qui contient plusieurs îles administratives de communes relevant de la zone O (îles administratives des communes ogliastriennes d'Arzana, Lanusei, Loceri, Jerzu et Ulassai et de la commune de Tertenia), est typiquement ogliastrienne, tant du point de vue des caractéristiques morphologiques que climatiques. Par conséquent, ces îles administratives et la municipalité de Tertenia sont réputées être déplacées de la zone T à la zone O. Cette modification permettrait également de rattacher le territoire des îles administratives aux principales municipalités.

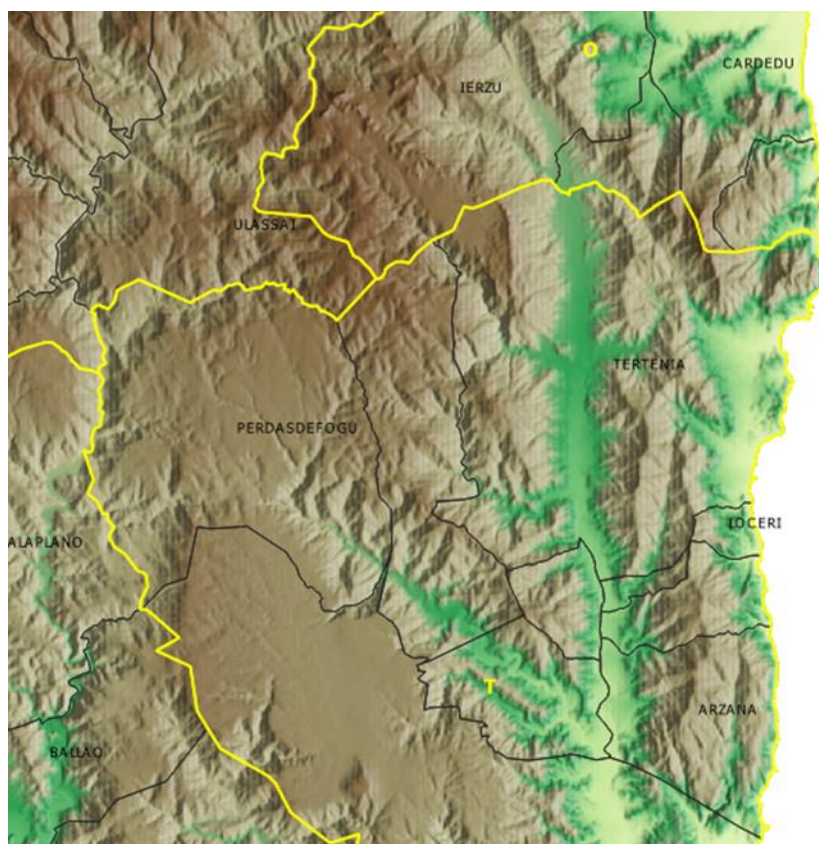


Figura 52: Limite de zone Q-O-T actuelle.

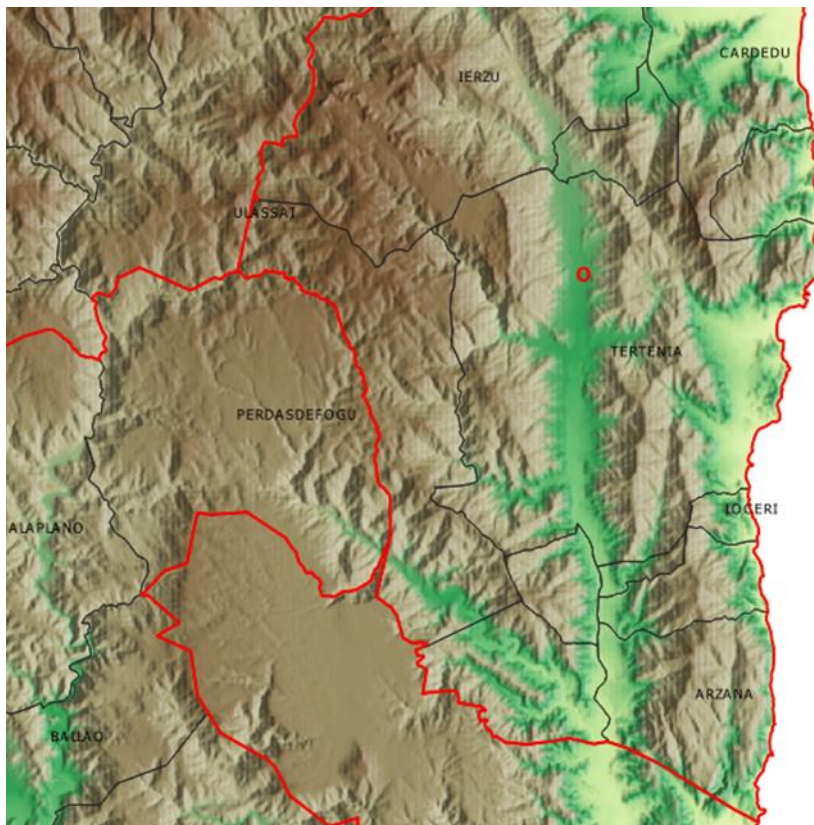


Figura 53: Une limite Q-O-T redéfinie.

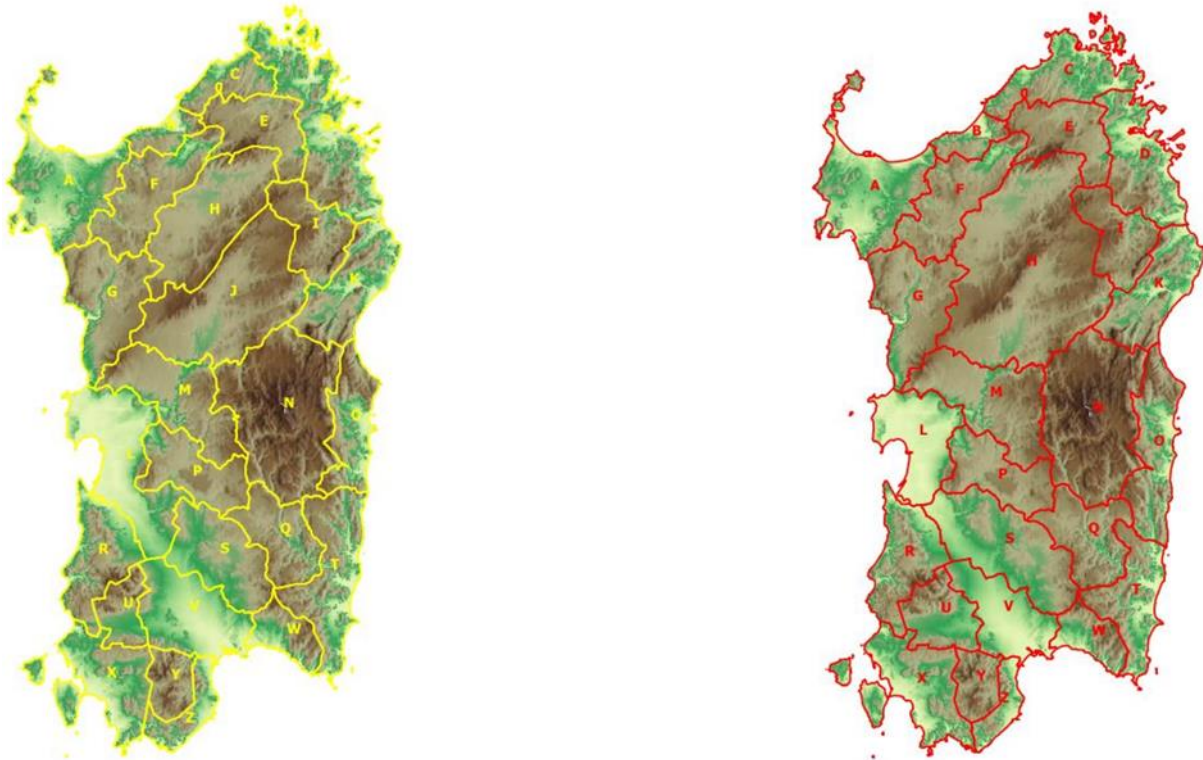


Figura 54: Zones actuelles (à gauche) et redéfinies (à droite).

Développement et validation du simulateur de propagation des feux de forêt sur le Web (WWS).

L'application de simulateurs de propagation pendant les incendies en cours pourrait faciliter l'évaluation du comportement et de la gravité du feu, en évaluant son potentiel de propagation pour un horizon temporel défini et en permettant ainsi de mettre en évidence les zones, par exemple à l'interface, qui nécessitent des interventions spécifiques de lutte contre l'incendie ou de sécurité. C'est avec cette philosophie que le CNR-IBE a développé un simulateur de propagation pour des applications en temps réel, qui représente également la capitalisation d'expériences précédentes développées dans le cadre du PO maritime, c'est-à-dire les projets Proterina-Due et Proterina-C (Programme Interreg Italie-France Maritime 2007-2013). Dans ces projets précédents, le BIE a réalisé un travail intensif de collecte de données et de production de cartes de végétation et de combustible, de calibration et de validation de modèles de combustible et de propagation, et a également développé la première version d'un modèle de réduction d'échelle des champs de vent. Dans le cadre des projets MedSTAR et Medcoopfire, le développement de la chaîne de modélisation nécessaire à la prédiction en temps réel de la propagation des feux de forêt a été réalisé, à travers les phases suivantes développement et parallélisation du code ; achèvement du développement de l'algorithme multigrille pour la prévision des champs de vent ; développement de fonctions pour la prévision probabiliste de la propagation ; développement d'une version du simulateur capable de fonctionner dans les autres régions du programme OP Marittimo développement de l'interface utilisateur graphique et des fonctionnalités pour l'accès en ligne au simulateur ; développement d'un code pour la prédiction des feux de couronne ; tests de fonctionnement et validation des algorithmes et de la chaîne de modélisation, réalisés sur un ensemble de données météorologiques et de données sur les feux de forêt qui se sont réellement produits au cours des saisons 2019, 2020 et 2021. Dans ce rapport, nous décrivons l'architecture du logiciel, les caractéristiques de la chaîne de modélisation et les résultats produits par le simulateur sur l'ensemble de validation.

Structure du simulateur.

Le simulateur est constitué d'une chaîne de modélisation composée d'un modèle de prévision météorologique, d'un module de gestion des données d'entrée-sortie, d'un modèle à cohérence de masse dédié à la réduction d'échelle des champs de vent, et d'un module qui simule la propagation des feux de forêt à partir des données fournies par les modules précédents. Une interface graphique accessible via le protocole http permet l'initialisation des simulations et la visualisation des sorties produites par le simulateur. Le logiciel est une

application client/serveur, il est écrit en langage Fortran et dialogue avec l'interface graphique Web-SIG par le biais du langage javascript et PHP ; la plupart du code est parallélisé pour minimiser les temps de calcul.

Le simulateur est conçu pour utiliser automatiquement les données d'entrée nécessaires à la caractérisation de l'événement, telles que la morphologie, les cartes de la végétation et donc du combustible végétal, et les conditions météorologiques à l'échelle régionale. Par conséquent, pour initialiser la simulation, l'opérateur doit entrer les coordonnées du point d'allumage, le lieu et l'heure de l'allumage, la durée de l'incendie et enfin la taille du domaine de simulation.

Le simulateur est capable d'effectuer une simulation déterministe à partir des coordonnées du point d'allumage saisies par l'opérateur ; alternativement, un mode de simulation probabiliste peut être utilisé dans lequel le simulateur initie de manière autonome une série de simulations avec des points d'allumage répartis autour du point d'allumage saisi par l'opérateur, sur une grille régulière. Pour chaque pixel du domaine de simulation, la fréquence à laquelle il est traversé par le feu est ensuite calculée par rapport au nombre de feux allumés, ce qui donne une estimation de la probabilité qu'un point soit traversé par le feu compte tenu de l'incertitude du point d'allumage.

Les données relatives à l'orographie et à la végétation jouent un rôle très important. Il s'agit de données statiques, ou de données dont l'échelle de variation temporelle est annuelle ; les caractéristiques de la végétation peuvent également varier au cours de l'évolution de la saison. À partir de ces données, stockées à haute résolution, le système est capable de détecter les entrées à la résolution requise par l'opérateur. En ce qui concerne les modèles de combustible, le simulateur utilise une carte des types de végétation et y associe les modèles de combustible les plus appropriés, sélectionnés à partir d'une base de données de modèles de combustible standard (Anderson, 1982 ; Scott et Burgan, 2005) ou plus fréquemment à partir d'un ensemble de modèles personnalisés résultant des activités de développement menées en Sardaigne (Arca et al. 2009). Les modèles fournissent différentes charges pour la fraction vivante et la fraction morte, cette dernière est ensuite divisée en trois catégories en fonction de l'épaisseur considérée : inférieure à 0,6 cm, entre 0,6 cm et 2,5 cm, et supérieure à 2,5 cm ; un ensemble de descripteurs des caractéristiques du combustible est attribué à chaque modèle de combustible, tels que la charge du combustible, le rapport surface/volume, la hauteur du combustible, l'humidité d'extinction et la chaleur développée pendant la combustion.

Un autre facteur clé est constitué par les conditions météorologiques qui déterminent l'humidité du combustible et les champs de vent avec lesquels les simulations de fronts de flamme sont effectuées ; ces données peuvent être saisies manuellement par l'opérateur, qui les obtient à partir des données mesurées par les stations météorologiques. Ces données peuvent également être fournies automatiquement par une chaîne de modélisation

météorologique spécialement développée, initialisée par les données de prévision des modèles de circulation globale. Dans la chaîne de modélisation, on utilise le modèle météorologique à échelle limitée WRF (Weather Research and Forecasting), qui fonctionne à des résolutions de 1 km. Le modèle a été paramétré pour les besoins spécifiques de la simulation de feu afin de minimiser l'erreur sur les champs de vent. WRF a été utilisé pour produire des données météorologiques pour la saison des incendies des années 2019-2020-2021, afin de tester le comportement du simulateur également sur les événements d'incendie qui se sont produits au cours des années passées. En ce qui concerne le fonctionnement en temps réel, le modèle WRF est exécuté quotidiennement, produisant des prévisions pour les 48 heures suivantes afin de simuler la propagation en temps réel. Afin d'augmenter la précision des champs de vent, un modèle cohérent en masse a été développé pour réduire l'échelle des champs de vent fournis par le modèle WRF (actuellement à une résolution de 1 km) à une résolution de 30 m afin de prendre en compte les effets locaux dus à la morphologie complexe. L'approche de la réduction d'échelle est basée sur la relaxation des contraintes dérivées des principes généraux de conservation de la masse, de l'énergie et de la quantité de mouvement. C'est précisément cette dernière loi de conservation, qui implique 3 équations scalaires alors qu'il s'agit d'une quantité vectorielle, qui implique une charge de calcul peu compatible avec les exigences du temps réel. L'énergie et la masse, en revanche, sont des quantités scalaires et le principe de leur conservation conduit donc à des équations scalaires. Sur les cinq équations traitant de la physique complète, seul le principe de conservation de la masse est pris en compte dans notre approche simplifiée. L'idée de base est d'ajuster une hypothèse de champ de vent initial de sorte que l'équation de continuité de la masse soit satisfaite. La stratégie de résolution implique une approche numérique par différences finies avec une grille horizontale régulière tandis que, afin de donner une meilleure représentation de la partie inférieure de la couche limite planétaire, la distribution des 128 niveaux verticaux suit une loi exponentielle, le premier niveau étant placé à 0,5 m.

Le simulateur est basé sur l'implémentation des équations du modèle quasi-empirique de comportement au feu de Rothermel, tandis que la technique de simulation utilisée est basée sur la méthode Level-Set. Le modèle de comportement du feu de Rothermel (1972) a été choisi parce qu'il offre un bon compromis entre la précision, l'effort de calcul et donc la souplesse des applications opérationnelles. Le modèle prédit le comportement du feu à l'aide d'équations qui prennent en compte l'énergie générée par le feu, la chaleur transférée du feu au combustible végétal adjacent et l'énergie absorbée par le combustible lui-même. La formulation du modèle est basée sur une série d'expériences de laboratoire réalisées avec de petits combustibles morts homogènes. Les caractéristiques du comportement du feu, en particulier la vitesse de propagation et l'intensité de la ligne de feu, sont calculées à l'aide de fonctions quasi-empiriques d'un grand nombre de variables indépendantes affectant la propagation. Les propriétés du combustible sont indiquées séparément pour les composants vivants et morts et pour les différentes classes de taille. Les propriétés sont moyennées entre les classes de taille en utilisant le rapport surface/volume comme facteur de pondération, tandis que les fractions vivantes et mortes sont traitées séparément. En ce qui

concerne la technique de propagation du feu, l'approche par ensembles de niveaux a été choisie dans le but de fournir un outil plus adapté aux applications opérationnelles, car elle se caractérise par une plus grande agilité de calcul et une meilleure portabilité vers des environnements de traitement parallèle que les simulateurs vectoriels. La méthode de l'ensemble des niveaux utilise une équation de Hamilton-Jacobi (une équation différentielle dérivée partielle hyperbolique) pour décrire la propagation du front de feu, qui est implicitement définie dans un espace plat bidimensionnel.

Validation du simulateur.

La phase de validation a été menée sur un ensemble d'études de cas représentées par des incendies qui se sont réellement produits, en Sardaigne et dans d'autres zones du programme, au cours des dernières saisons des incendies. Le simulateur a démontré sa capacité à fournir des prédictions de propagation et de comportement du feu en accord substantiel avec les périmètres réels et un coût de calcul adapté aux applications en temps réel. Le système produit les thèmes utiles suivants pour caractériser le comportement du feu : périmètre simulé, vitesse de propagation, intensité du front de flamme, longueur de la flamme, heure d'arrivée, carte du combustible, carte du feu de couronne, carte du champ de vent, carte de l'humidité du combustible. Parmi ces paramètres figure la vitesse de propagation, estimée en mètres par minute, qui est un paramètre essentiel pour la mise en place des activités de lutte contre les incendies, mais aussi pour l'identification des zones du quartier particulièrement à risque, comme les abords des zones habitées, qui, grâce à l'estimation de la vitesse de propagation et du moment d'arrivée des flammes, peuvent être protégées de manière adéquate, par exemple avec des interventions de protection civile et d'évacuation. Un autre thème essentiel pour la planification des interventions de lutte contre les incendies est l'intensité de la ligne de feu, qui mesure en kW/m l'énergie libérée par le combustible végétal par mètre de front de feu ; ce paramètre est essentiel car il permet de fixer les seuils minimums nécessaires pour effectuer des interventions de lutte contre les incendies en toute sécurité et donc d'identifier les zones du territoire les plus appropriées pour effectuer des interventions ; de même, pour les interventions aériennes, les valeurs d'intensité de la ligne de feu prévues peuvent guider le choix des moyens et fournir des indications sur l'efficacité potentielle des interventions elles-mêmes. Ces thèmes, ainsi que les informations sur les conditions météorologiques également fournies par la chaîne de modélisation, par exemple les estimations de l'humidité du combustible et les estimations de la direction et de l'intensité du vent, peuvent être très utiles pour orienter les choix d'intervention tactique. Vous trouverez ci-dessous une série de cartes de certaines des études de cas utilisées dans la phase de test et de validation du simulateur.

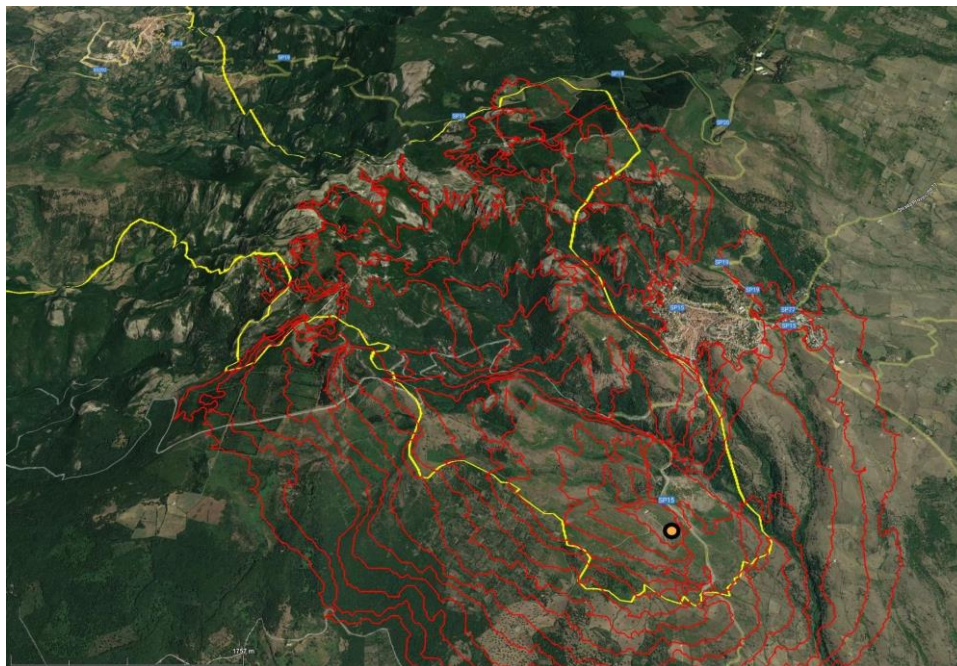


Figura 55: Périmètre simulé (rouge) et réel (jaune) de la première marche de l'incendie de Montiferru (24/07/2021). Les lignes rouges indiquent la progression du feu simulé pour chaque demi-heure de propagation. Le point d'apparition est indiqué par le point orange.

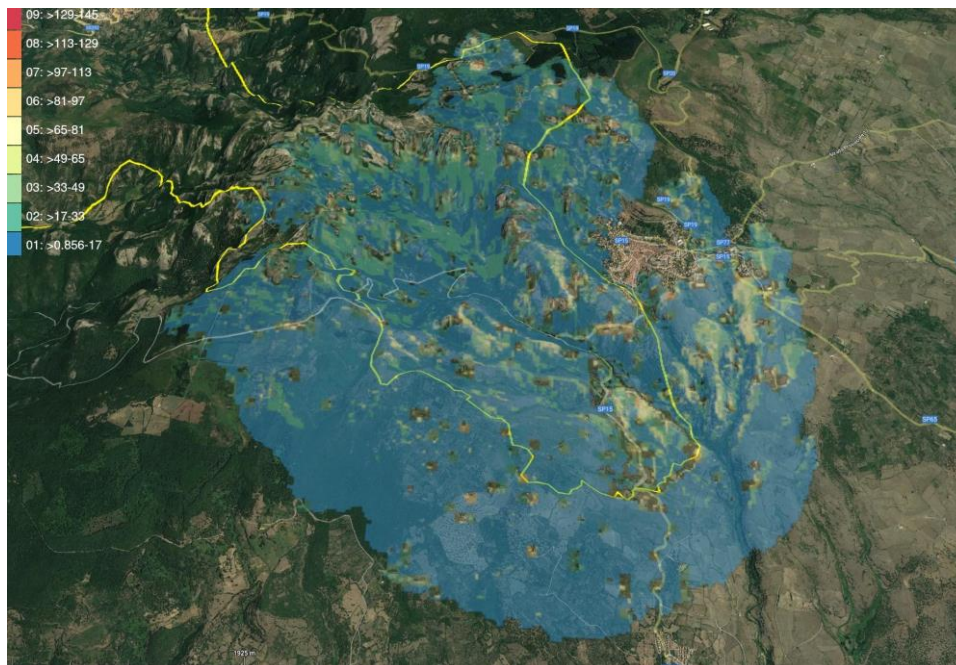


Figura 56: Carte de la vitesse de propagation (m/minute) de la première marche du feu de montiferru (24/07/2021). Des valeurs élevées de la vitesse de propagation se produisent dans la zone proche du point d'insurrection et dans la partie nord-ouest, très exposée aux vents et caractérisée par des pentes abruptes.

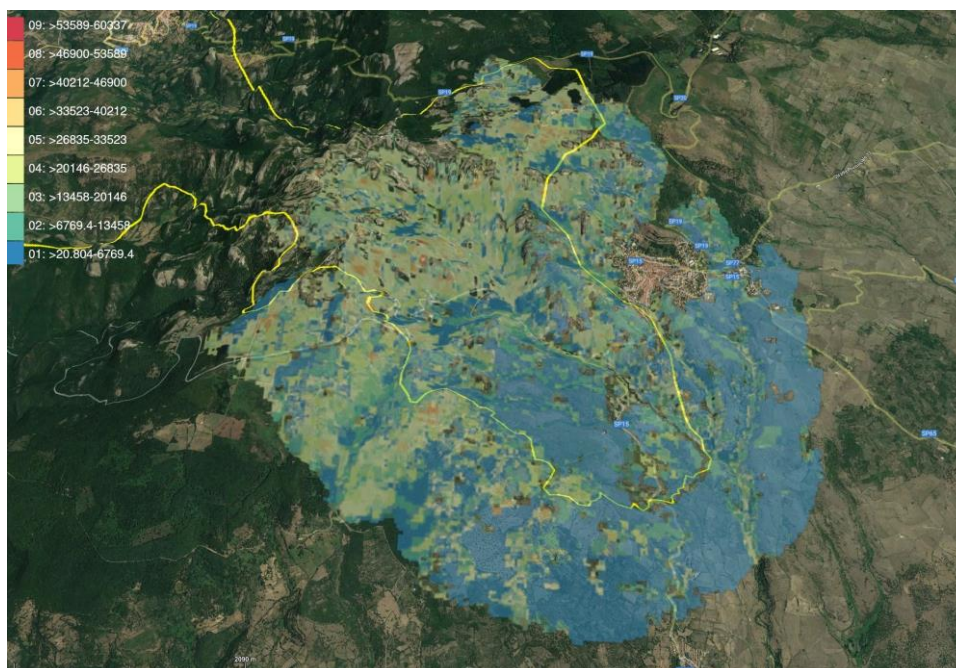


Figura 57: Carte de l'intensité de la ligne de feu (kw/m) de la première étape du feu de montiferru (24/07/2021). Des valeurs de haute intensité, supérieures à 25 000 kw/m, se produisent dans les zones forestières de haute altitude (nord-ouest) caractérisées par de fortes charges de combustible et une continuité verticale de la végétation.

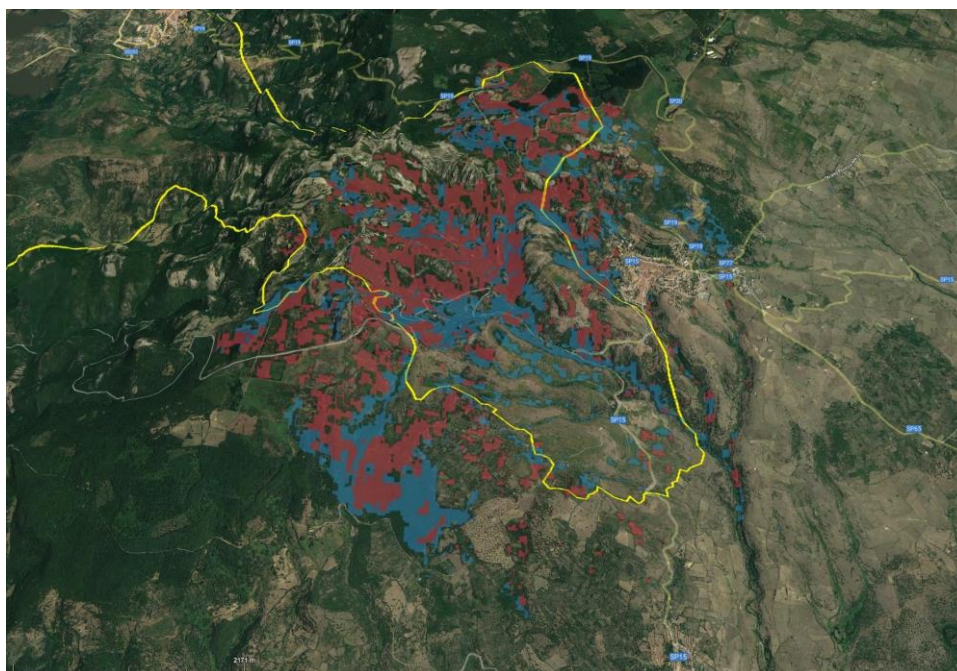


Figura 58: Carte des zones affectées par le feu de cime passif (zones bleues) et actif (zones rouges) lors de la première étape du feu de monteferru (24/07/2021).

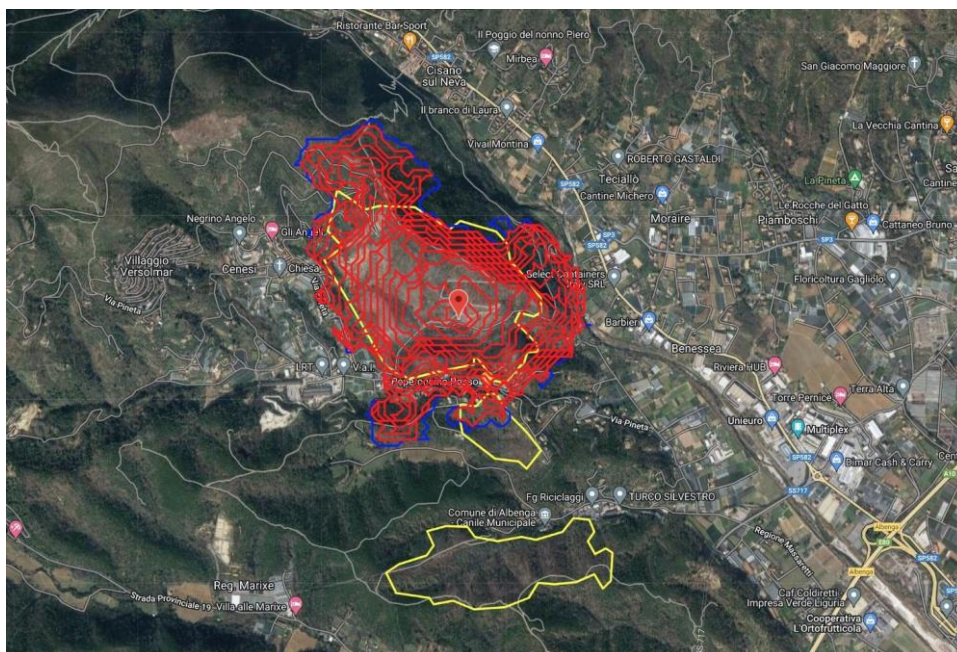


Figura 59: Périmètre simulé (rouge) et réel (jaune) de l'incendie de Cisano sul Neva (06/09/2021). Les lignes rouges indiquent la progression du feu simulé pour chaque demi-heure de propagation. Le point de déclenchement est indiqué par le pointeur rouge.

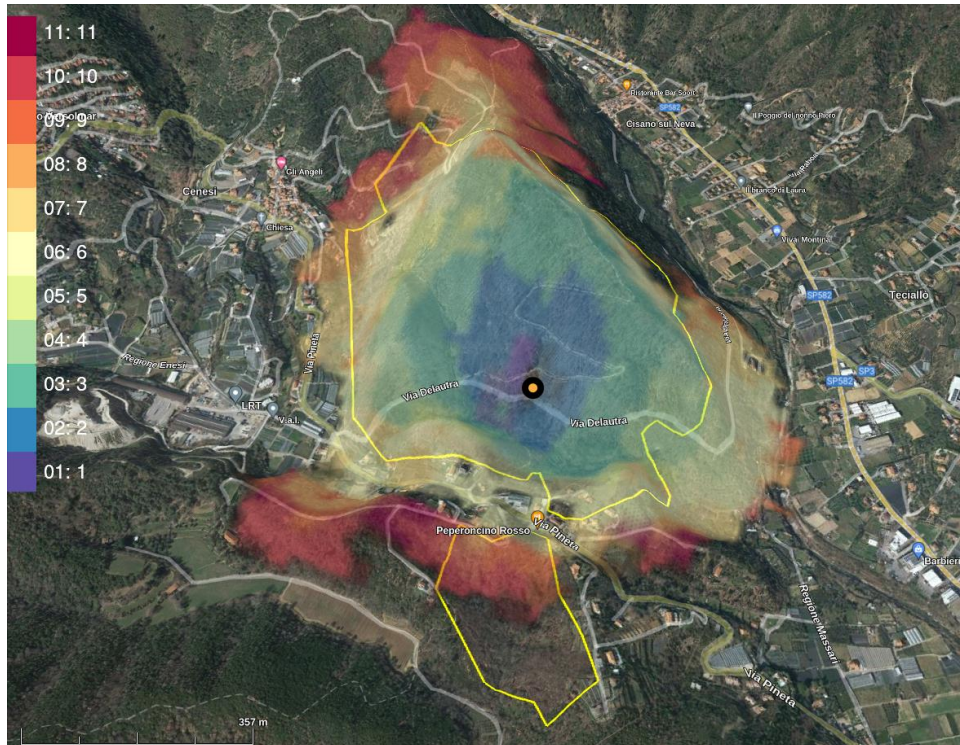


Figura 60: Carte de l'heure d'arrivée des flammes aux différents points de l'incendie de Cisano sul Neva (06/09/2021), à partir du point d'apparition (indiqué par le point orange).

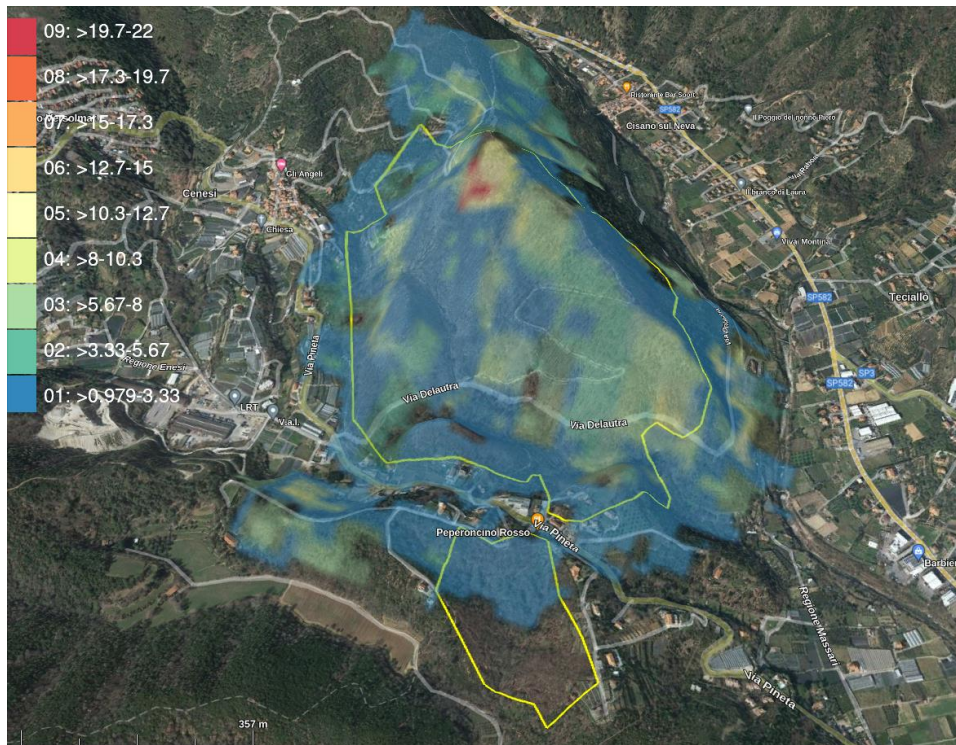


Figura 61: Carte de la vitesse de propagation (m/minute) de l'incendie à Cisano sul Neva (06/09/2021). Les valeurs les plus élevées de la vitesse de propagation se sont produites près du point d'apparition et près de la ligne de crête.

Développement et validation du simulateur PROPAGATOR.

PROPAGATOR est un modèle d'automate cellulaire stochastique pour la simulation de la propagation des feux de forêt, conçu comme une méthode rapide d'évaluation des risques d'incendie. Le modèle utilise des informations à haute résolution telles que la topographie et la couverture végétale, en tenant compte des différents types de végétation. Chaque type de végétation est caractérisé par des valeurs différentes de susceptibilité au feu et de vitesse du front de flamme. Les paramètres d'entrée du modèle sont la vitesse et la direction du vent et le point d'allumage. La teneur en humidité du combustible mort fin peut également être prise en compte et l'option permettant de simuler le phénomène de tache peut être sélectionnée. Les conditions limites peuvent être sélectionnées par l'utilisateur ou récupérées à partir d'un modèle météorologique (pour ce qui est du vent) et de RISICO (pour ce qui est de l'humidité de la nécromasse).

Chaque simulation peut inclure l'effet de différentes stratégies de lutte contre le feu, telles que des actions terrestres de lutte contre le feu avec des conduites d'eau ou la coupe de la végétation, et des actions aériennes de lutte contre le feu avec des Canadairs et des hélicoptères. La souplesse du modèle facilite la représentation du scénario d'incendie de forêt souhaité. La probabilité de propagation du feu dépend du type de végétation, de la pente, de la direction et de la vitesse du vent et de la teneur en humidité du combustible. La vitesse de propagation du feu est déterminée à l'aide d'un modèle de "taux de propagation" de la littérature. PROPAGATOR simule des réalisations indépendantes d'un processus stochastique de propagation du feu et, à chaque étape temporelle, produit une carte représentant la probabilité que chaque cellule du domaine soit affectée par le feu. Ces probabilités sont obtenues en calculant la fréquence d'allumage relative de chaque cellule parmi toutes les simulations effectuées.

Une simulation d'un incendie de 24 à 48 heures peut être réalisée en quelques minutes à l'aide de la plateforme MEDSTAR. Chaque simulation permet de visualiser les isochrones horaires du front de flamme, la carte de probabilité d'arrivée du feu pour chaque heure de simulation, les cartes de vitesse ("Rate of Spread") et d'intensité linéaire ("Fireline Intensity") du front de flamme, maximale et moyenne, pour chaque pixel du domaine.

Une étude de cas sur le site de Valle di Vado est illustrée ci-dessous. Un scénario d'incendie initié dans l'interface entre la forêt et la ville est simulé, plus précisément à quelques mètres de la décharge de Bossarino, au nord-ouest de l'autoroute Autostrada dei Fiori. Le feu est simulé pendant 8 heures, avec un vent de sud-est soufflant à 37km/h au moment de l'allumage puis, après une heure, restant soutenu à 18km/h. L'humidité de la nécromasse reste à 6% (condition d'humidité critique) pendant toute la durée de la simulation.

Trois scénarios sont simulés :

Une opération terrestre "actions lourdes" est mise en place, avec enlèvement du combustible par des véhicules terrestres (43 hectares brûlés après 8 heures).
 Identique au cas 1), mais avec le repérage du feu activé dans le simulateur (47 hectares brûlés après 8 heures).
 Avec simulation de taches de feu, et sans aucune intervention des pompiers (183 hectares brûlés après 8 heures)

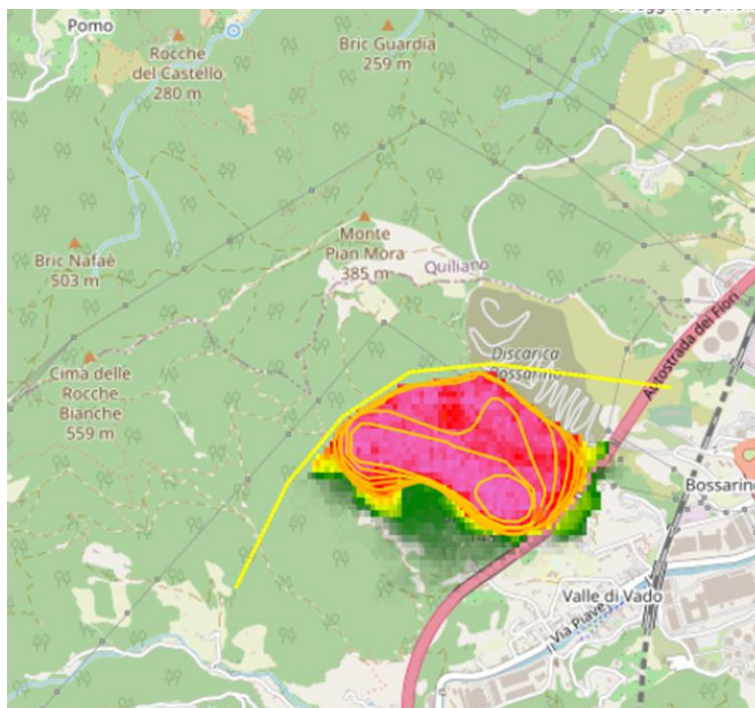


Figura 62: Cas 1.



Interreg



UNION EUROPEENNE
UNIONE EUROPEA

MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fonds européen de développement régional
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



MED-Star

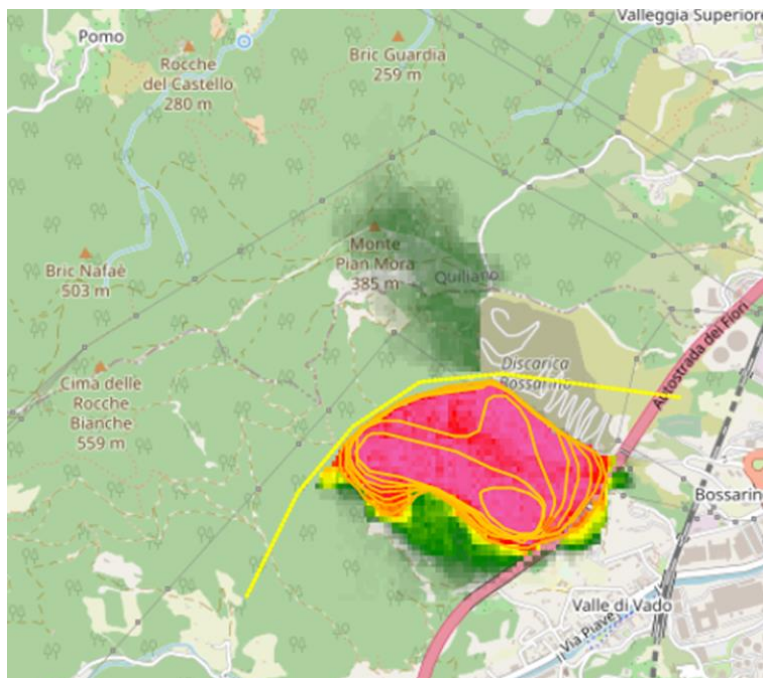


Figura 63: Cas 2.

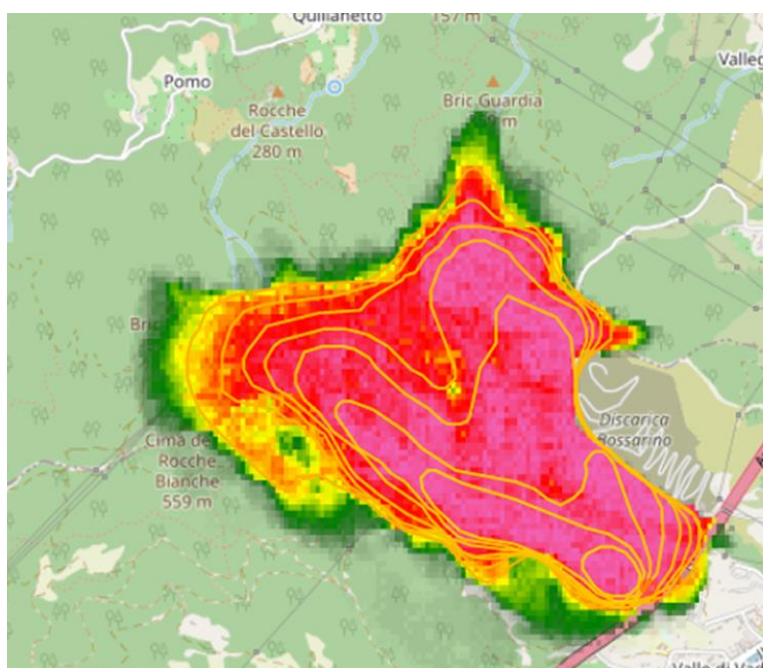


Figura 64: Cas 3.

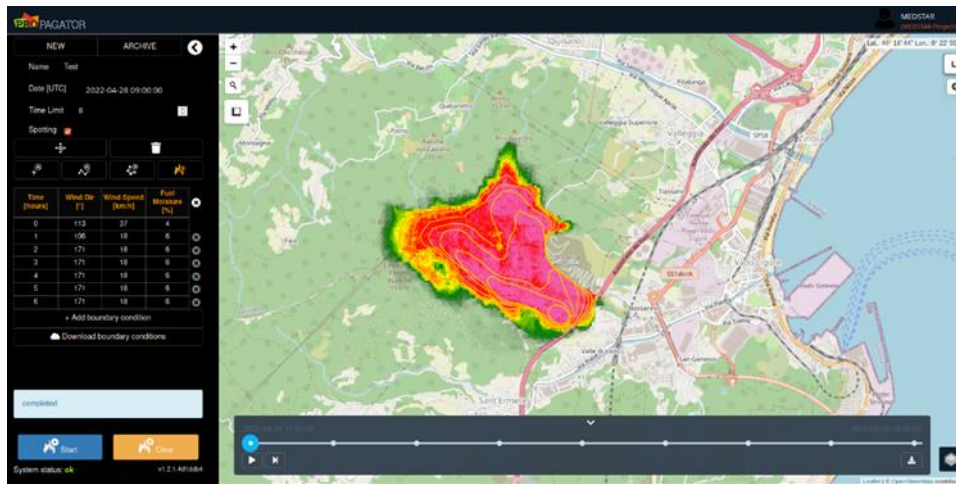


Figura 65: Exemple d'interface utilisateur PROPAGATOR sur Mydewetra World.

Références bibliographiques.

- Anderson, H.E., Aids to Determining Fuel Models for Estimating Fire Behavior, US Department of Agriculture, Forest Service, 1982. General Technical Report INT-122.
- Baghino, F.; Trucchia, A.; D'Andrea, M.; Fiorucci, P. PROPAGATOR, a Cellular Automata Model for Fast Wildfire Simulations: Latest Improvements and Future Perspectives. Environ. Sci. Proc. 2022, 17, 60. <https://doi.org/10.3390/environsciproc2022017060>.
- Bertani R, Bovio G, Petrucci B (2018). Manuale per l'applicazione dello "schema di piano A.I.B. nei Parchi Nazionali - 2018". Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, direzione per la protezione della natura e del mare, con il contributo scientifico della Accademia Italiana di Scienze Forestali
- Bright BC, Hudak AT, Meddens AJH, Hawbaker TJ, Briggs JS, Kennedy RE (2017). Prediction of forest canopy and surface fuels from lidar and satellite time series data in a bark beetle-affected forest. Forests. 8: 1–22. - doi: 10.3390/f8090322
- Canu, S., Rosati, L., Fiori, M., Motroni, A., Filigheddu, R., Farris, E., 2015. Bioclimate map of sardinia (Italy), J. Maps 11 711–718, <https://doi.org/10.1080/17445647.2014.988187>.
- D'Este MD, Elia M, Giannico V, Spano G, Laforteza R, Sanesi G (2021). Machine Learning Techniques for Fine Dead Fuel Load Estimation Using Machine Learning Techniques

- for Fine Dead Fuel Load Estimation Using Multi - Source Remote Sensing Data. Remote Sensing. - doi: 10.3390/rs13091658
- Dessy, C., Castiglia, C., Delitala, A.M.S., 2022. Applicazioni di modellistica numerica meteorologica – sviluppate nel contesto del progetto strategico MED-Star – per l’analisi e previsione del pericolo incendi boschivi, casi studio di eventi rilevanti. Seconda Conferenza nazionale sulle previsioni meteorologiche e climatiche (Bologna, 21-22 Giugno 2022). [Contributo selezionato per il tema: “Previsioni e sistemi di allerta per la gestione e la mitigazione del rischio].
- Domingo D, de la Riva J, Lamelas MT, Garcia-Martin A, Ibarra P, Echeverria M, Hoffrén R (2020). Fuel Type Classification Using Airborne Laser Scanning and Sentinel 2 Data in Mediterranean Forest Affected by Wildfires. Remote Sensing. 1–22.
- Fiorucci, P., Gaetani, F., Minciardi, R., 2008. “Development and application of a system for dynamic wildfire risk assessment in Italy”. Environmental Modelling and Software, 23, pp. 690-702
- Haines, D. A., 1998. A lower atmosphere severity index for wildland fires. National Weather Digest 13, 23–27.
- Heisig J, Olson E, Pebesma E (2022). Predicting Wildfire Fuels and Hazard in a Central European Temperate Forest Using Active and Passive Remote Sensing. Fire. 1–23.
- Jain P, Coogan SCP, Subramanian SG, Crowley M, Taylor S, Flannigan MD (2020). A review of machine learning applications in wildfire science and management. Environmental Reviews. 28: 478–505. - doi: 10.1139/er-2020-0019
- Keane, Robert E., Dickinson, Laura J (2007). The photoload sampling technique: estimating surface fuel loadings from downward-looking photographs of synthetic fuelbeds. General Technical Report RMRS-GTR-190. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 44 p.
- Piyush J, Sean C.P. Coogan, Sriram Ganapathi Subramanian, Mark Crowley, Steve Taylor, and Mike D. Flannigan (2020). A review of machine learning applications in wildfire science and management. Environmental Reviews. 28(4): 478-505. <https://doi.org/10.1139/er-2020-0019>
- Potapov P, Li X, Hernandez-Serna A, Tyukavina A, Hansen MC, Kommareddy A, Pickens A, Turubanova S, Tang H, Silva CE, Armston J, Dubayah R, Blair JB, Hofton M (2021). Mapping global forest canopy height through integration of GEDI and Landsat data. Remote Sensing of Environment. 253: 112165. - doi: 10.1016/j.rse.2020.112165
- Potter B., 2018. The Haines Index – it’s time to revise it or replace it. - International Journal of Wildland Fire 27, 437-440.
- Salis, M., Arca, B., Del Giudice, L., Jahdi, R., Pellizzaro, G., Ager, A., Alcasena Urdiroz, F., Scarpa, C., Schirru, M., Bacciu, V., Casula, M., Pedes, F., Ventura, A., Canu, A., Duce, P., 2022. Wildfire simulation modeling to analyze wildfire hazard and exposure in the Italy-France Maritime cooperation area (Sardinia, Corsica, Tuscany, Liguria and Provence-Alpes-Côte d’Azur). Proceedings of the Third International Conference on Fire Behaviour and Risk (ICFBR2022), Alghero (Italy), 3-6 May 2022. (in print)
- Scott, J.H., Burgan, R., Standard Fire Behavior Fuel Models: a Comprehensive Set for Use with Rothermel’s Surface Fire Spread Model, US Department of Agriculture, Forest Service, 2005. General Technical Report RMRS-GTR-153.
- Trucchia, A.; D’Andrea, M.; Baghino, F.; Fiorucci, P.; Ferraris, L.; Negro, D.; Gollini, A.; Severino, M. PROPAGATOR: An Operational Cellular-Automata Based Wildfire Simulator. Fire 2020, 3, 26. <https://doi.org/10.3390/fire3030026>.



Woodall CW, Rondeux J, Verkerk PJ, Ståhl G (2009). Estimating Dead Wood During National Forest Inventories: A Review of Inventory Methodologies and Suggestions for Harmonization. *Environmental Management* 44: 624–631. <https://doi.org/10.1007/s00267-009-9358-9>.