

ŞCOALA DOCTORALĂ INTERDISCIPLINARĂ
Facultatea de Silvicultură și Exploatare Forestiere

Adrian LORENT

Utilizarea tehnologiilor geospațiale pentru modelarea
hazardului la incendii de pădure și analiza factorilor
favorizanți

The use of geospatial technologies for forest fire hazard
modeling and the analysis of contributing factors

REZUMAT

Conducător științific

CS. I dr. ing. Nicolae Ovidiu BADEA

Membru corespondent al Academiei Române

BRAȘOV, 2024

D-lui (D-nei)

COMPONENŢA

Comisiei de doctorat

Numită prin ordinul Rectorului Universităţii Transilvania din Braşov

Nr. D.015 din 21.06.2024

PREŞEDINTE: Prof. univ. dr. ing. Alexandru Lucian CURTU

CONDUCĂTOR
ŞTIINŢIFIC: CS I. dr. ing. Nicolae Ovidiu BADEA

REFERENŢI: CS I. dr. ing. Ioan SECELEANU
CS I. dr. ing. Ionel POPA
Conf. dr. ing. Gheorghe Marian TUDORAN

Data, ora şi locul susţinerii publice a tezei de doctorat: 04.09.2024, ora 11:00, sala SI2.

Eventualele aprecieri sau observaţii asupra conţinutului lucrării vor fi transmise electronic, în timp util, pe adresa lorentadrian@gmail.com

Totodată, vă invităm să luaţi parte la şedinţa publică de susţinere a tezei de doctorat.

Vă mulţumim.

LISTĂ DE ABREVIERI	3/2
PREFAȚĂ.....	5/3
1. INTRODUCERE.....	6/4
2. SCOPUL ȘI OBIECTIVELE CERCETĂRILOR	9/7
3. METODA ȘI MATERIALUL DE CERCETARE	10/7
3.1 Localizarea Cercetărilor	10/7
3.2 Cartarea distribuției tipurilor de combustibili pentru suprafețele acoperite cu vegetație din România	11/8
3.3 Determinarea hazardului la incendii de pădure și analiza factorilor favorizanți ai acestora	12/10
3.4 Evaluarea efectelor post-incendiu pe baza imaginilor și produselor satelitare de înaltă rezoluție spațială	14/12
3.5 Prelucrarea imaginilor satelitare	17/15
3.6 Detectarea și localizarea incendiilor de pădure și urmărirea evoluției acestora pe baza imaginilor satelitare de înaltă rezoluție temporală	22/19
4. REZULTATE	23/20
4.1 Cartarea distribuției tipurilor de combustibili pentru suprafețele acoperite cu vegetație din România	23/20
4.2 Zonarea hazardului și identificarea factorilor favorizanți pentru producerea incendiilor de pădure	30/26
4.2.1 Obținerea bazei de date geo-spațială și a hărții GIS a evenimentelor de incendiu produse în perioada anilor 2006-2023	30/26
4.2.2 Obținerea variabilelor independente pentru evaluarea hazardului la incendiile de pădure și identificarea factorilor favorizanți.....	33/29
4.2.3 Identificarea factorilor favorizanți la incendiile de pădure și zonarea hazardului prin rularea modelelor explicative.....	40/33
4.2.3.1 Generarea hărții de hazard și identificarea factorilor favorizanți la incendii de pădure cu ajutorul modelului Random Forest.....	40/33
4.2.3.2 Generarea hărții de hazard și identificarea factorilor favorizanți la incendii de pădure cu ajutorul regresiei logistice.....	43/36
4.3 Determinarea suprafețelor de pădure incendiate și a gradului de severitate a incendiilor ..	49/42
4.4 Detectarea și localizarea incendiilor de pădure și urmărirea evoluției acestora pe baza imaginilor satelitare de înaltă rezoluție temporală.....	56/48
5. CONCLUZII.....	63/52
6. CONTRIBUȚII ORIGINALE	67/56
7. DISEMINAREA REZULTATELOR.....	69/58
LISTA DE TABELE	73/62
LISTA DE FIGURI	74/63



BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ.....	77/65
SCURT REZUMAT.....	83/71
SHORT RESUMES.....	83/71



LISTĂ DE ABREVIERI

JCR	Joint Research Centre
ANCPI	Agenția Națională de Cadastru și Publicitate Imobiliară
ANN	Artificial Neural Network (rețele neuronale artificiale)
CART	Classification and Regression Trees (arbori de clasificare și regresie)
CIR	Color Infrared (infraroșu color)
CI _{RE1}	Chlorophyll Index red-edge
CLC	Corine Land Cover
CORINE	Coordination of information on the environment
DJ	Drum Județean
DN	Drum Național
dNBR	Differenced Normalized Burn Ratio (raportul diferențial normalizat al arderii)
dNBR _n	Differenced Normalized Burn Ratio narrow
EFFIS	European Forest Fire Information System
ESA	European Space Agency
ESRI	Environmental Systems Research Institute
EVI	Enhanced Vegetation Index
FIRMS	Fire Information for Resource Management System
GIS	Geographic Information System (sistem informatic geografic)
GMT	Greenwich Mean Time
GNDVI	Green Normalized Difference Vegetation Index
GWR	Geographically Weighted Regression
IC	Indice de Combustibilitate
IGSU	Inspectoratul General pentru Situații de Urgență
INCDS	Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare în Silvicultură "Marin Drăcea"
LiDAR	Light Detection and Ranging
MaxEnt	Maximum Entropy
MMAP	Ministerul Mediului, Apelor și Pădurilor
MODIS	MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer
MSR _{RE1}	Modified Simple Ratio red-edge
MSR _{RE1n}	Modified Simple Ratio red-edge narrow
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NBR	Normalized Burn Ratio (<i>Raportul Normalizat al Arderii</i>)
NBR _n	Normalized Burn Ratio narrow
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index (indicele diferențial normalizat al vegetației)
NDVI _{RE1}	Normalized Difference Vegetation Index red-edge 1
NDVI _{RE1n}	Normalized Difference Vegetation Index red-edge1 narrow
NIR	Near InfraRed (infraroșu apropiat)
RBR	Relativized Burn Ratio
RdNBR	Relative differenced Normalized Burn Ratio
RF	Random Forest
RGB	Red, Green, Blue (roșu, verde, albastru)
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SWIR	Shortwave Infrared (infraroșu de undă scurtă)
TPI	Topographic Position Index (indicele topografic de poziție)
TRASP	Topographic Solar Radiation Aspect Index (indicele topografic de cuantificare a radiației solare)
TWI	Topographic Wetness Index (indicele topografic de umiditate)
UAT	Unitate Administrativ-Teritorială
UP	Unitate de Producție
USGS	United States Geological Survey
VCF	Vegetation Continuous Fields
VIIRS	Visible Infrared Imaging Radiometer Suite

PREFAȚĂ

În decursul timpului, în țara noastră incendiile de pădure s-au produs cu diferite frecvențe, intensități (energia arderii) și severități (pierderile de materie organică rezultate în urma arderii), având consecințe importante materializate în pierderi directe economice, modificări ale comportamentului social și a calității vieții, precum și degradări de natură ecologică. Evaluarea riscului la incendiile de pădure și implicit a efectelor acestora a devenit astfel necesară în scopul elaborării unei politici integrate de prevenție și combatere la nivel local, regional și național a acestui tip de risc. Totodată, înțelegerea forțelor motrice ale incendiilor de pădure și a factorilor determinanți pentru declanșarea și propagarea acestora constituie o preocupare asiduă atât pentru comunitatea științifică cât și pentru practicieni, în speță personalul de intervenție la acest tip de dezastru. Cu toate că în România riscul la incendii de pădure este destul de redus în comparație cu alte tipuri de dezastru în ciuda unei probabilități de manifestare ridicate, se remarcă o tendință evidentă de exacerbare a acestui fenomen, prin apariția unor sezoane de incendii excepționale, cum au fost cele din 2012 sau 2022.

Teza de doctorat *“Utilizarea tehnologiilor geospațiale pentru modelarea hazardului la incendii de pădure și analiza factorilor favorizanți”* urmărește să vină în sprijinul aprofundării cunoștințelor fenomenului incendiilor de pădure în România, utilizând în acest sens tehnologii geospațiale moderne, precum teledetecția și sistemele informatice geografice, pentru zonarea pericolului la incendii, identificarea și analiza factorilor antropici și ambientali determinanți în apariția acestora în scopul creșterii gradului de prevenție și de atenuare a efectelor incendiilor de pădure.

Realizarea acestor obiective nu ar fi fost posibilă fără sprijinul neîncetat al conducătorului științific CS I dr. ing. Nicolae Ovidiu Badea, membru corespondent al Academiei Române. Îmi exprim toată recunoștința și mulțumirile mele sincere pentru efortul depus, generozitatea, susținerea și răbdarea manifestate în îndrumarea competentă și constantă pe durata elaborării acestei teze de doctorat, precum și pentru contribuția sa esențială la formarea mea profesională în domeniul științei incendiilor de pădure.

Mulțumesc, pe această cale, domnilor Prof. dr. ing. Iosif Vorovencii și Conf. dr. ing. Mihai Daniel Niță și doamnei Prof. dr. ing. Valentina Doina Ciobanu pentru amabilitatea, sfaturile și recomandările acordate cu ocazia susținerii rapoartelor științifice și pe parcursul elaborării tezei.

Alese mulțumiri aduc domnului Prof. dr. ing. Lucian Curtu, decanul Facultății de Silvicultură și Exploatarea Forestiere din Braşov. Adresez de asemenea, respectuoase mulțumiri domnilor CS I Dr. ing. Ioan Seceleanu, CSI dr. ing. Ionel Popa cât și Conf. dr. ing. Gheorghe Marian Tudoran pentru amabilitatea domniilor lor de a face parte din comisia de analiză a tezei de doctorat.

Îmi exprim aprecierea sinceră și le mulțumesc pentru ajutorul și încurajările permanente colegilor mei din cadrul Institutului Național de Cercetare-Dezvoltare în Silvicultură (INCDS) „Marin Drăcea”, în mod special domnilor dr. ing. Bogdan Apostol, dr. ing. Marius Petrilă, dr. ing. Vladimir Gancz, ing. Florin Capalb și doamnei geograf Cristiana Marcu. De asemenea, doresc să adresez mulțumiri ing. Joița Apostol cât și regretatei colege geograf Sorina Farcaș.

Nu în ultimul rând doresc să mulțumesc mamei mele, Lucia, și surorilor mele Olivia, Alina și Lucia pentru susținerea morală, răbdarea și înțelegerea manifestată cu generozitate pe întreaga perioadă de desfășurare a tezei de doctorat. Un gând aparte se îndreaptă către tatăl care ar fi cunoscut o emoție deosebită în aceste momente.

Această listă de aprecieri și mulțumiri este cu siguranță incompletă, de aceea, le mulțumesc tuturor celor nenominalizați în aceste rânduri și care mi-au fost alături și m-au sprijinit direct sau indirect în realizarea tezei de doctorat.

1. INTRODUCERE

Incendiile de pădure constituie o cauză majoră a degradării ecosistemelor și pot duce la pierderi de vieți umane, dezastre economice și ecologice (diminuarea resurselor, pierderea biodiversității, intensificarea procesului de eroziune a solului, reducerea capacității de regenerare a pădurilor, accelerarea procesului de deșertificare în zonele uscate) precum și tulburări sociale însoțite de migrarea populației (Heikkila et al. 2010). Studii recente arată că anual ard global peste 4 milioane km² de pădure (Lizundia-Loiola et al. 2020) deteriorând totodată serviciile ecosistemice furnizate de păduri. Focul este un proces natural în anumite ecosisteme, în speță cele mediteraneene, unde multe plante și animale necesită focul pentru supraviețuirea lor (Kelly & Brotons, 2017), dar în altele cum sunt ecosistemele boreale sau cele temperate, focul afectează negativ biodiversitatea, în special atunci când regimurile naturale de incendiu se schimbă brusc (Lewis et al. 2015).

Rolul cercetărilor științifice și tehnologice în domeniul incendiilor de vegetație în general și de pădure, în special, este acela că instrumentele și cunoștințele produse de comunitatea științifică ajută agențiile guvernamentale internaționale, naționale și regionale precum și alte organizații implicate în gestionarea incendiilor să asigure siguranța și reziliența comunităților la incendii, să contribuie la refacerea ecosistemelor afectate de incendii și să reducă efectele negative ale acestora asupra populației, comunităților și mediului. Un program echilibrat de gestionare a incendiilor va întrebuița o serie de mecanisme de răspuns la incendii care pot fi apelate atât în ceea ce privește partea de planificare și prevenire cât și suprimarea acestora.

Acoperirea cu vegetație, structura, compoziția și starea de umiditate a acesteia joacă un rol esențial în declanșarea și răspândirea incendiilor. Caracterizarea și cartografierea acestor caracteristici sunt de o importanță crucială pentru evaluarea și reducerea riscului de incendiu. Combustibilii pentru incendii pot fi descriși din punct de vedere al caracteristicilor chimice, inflamabilității și proprietăților fizice, care afectează procesul de ardere și includ cantitatea, dimensiunea și forma, compactitatea și aranjamentul acestora (Chiuvienco et al. 2023). În funcție de stratificarea pe verticală, combustibilii pentru incendii pot fi clasificați în combustibili de sol, de suprafață și de coroană, fiecare dintre ei prezentând diferite modele de comportament al focului (Barrows 1951).

Sub aspect metodologic, au fost elaborate, prin metode directe, modele care presupun campanii intensive de teren în care se măsoară proprietățile combustibililor după un eșantionaj stratificat în funcție de tipurile de vegetație dominantă și de structura acesteia (vegetație erbacee, vegetație arbustivă, pădure etc.) (Scott și Burgan, 2005). Pentru combustibilii de suprafață cei mai frecvenți parametri mășurați sunt: încărcătura frunzișului, încărcătura și adâncimea literei, încărcătura de arbuști (până la 2 m înălțime) și de vegetație erbacee (vie sau uscată). Încărcăturile de combustibil (greutatea combustibilului pe unitatea de suprafață) sunt determinate prin măsurarea greutății în stare uscată.

Dezavantajul acestei metode, deși considerată cea mai precisă datorită prelevării de date de teren după un eșantionaj stratificat, necesită un efort și un timp lung pentru elaborare.

Alternativ, există o practică obișnuită de obținere a unor modele (tipuri) de combustibil de vegetație care să conducă la realizarea hărților aferente prin echivalarea indicilor de combustibilitate pe baza seturilor de date existente (Won et al. 2006, Sandberg et al. 2001). Această abordare a fost adoptată în cadrul proiectului „FUELMAP”, care a fost implementat de Centrul Comun de Cercetare al Uniunii Europene (Joint Research Centre – JRC) Ispra, și a oferit o primă abordare a tipologiei standardizate a combustibililor forestieri pentru Europa precum și o hartă cu distribuția tipurilor de păduri în Uniunea Europeană (UE) (JRC 2011) și constă în utilizarea seturilor de date geo-spațiale și a datelor de teledetecție pentru echivalarea hărților tipurilor de vegetație cu tipurile de combustibili.

La nivel internațional, cercetările privind analiza modelelor de apariție a incendiilor pe baza evenimentelor istorice, evaluarea riscului la incendii și prioritizarea zonelor cunosc o atenție și o dezvoltare sporită îndeosebi în biomurile mediteraneene din America de Nord (Syphard et al. 2008),

ţările din Europa mediteraneană (Chuvieco et al. 2010, Catry et al. 2009, Ganteaume et al. 2013), America Latină (Castro et al. 1998, González et al. 2009) sau Australia (Turner et al. 2011). Mai recent, dinamica şi provocările incendiilor de pădure au fost evidenţiate în regiuni precum America Centrală şi de Sud (Armenteras et al. 2016), Elveţia (Zumbrunnen et al. 2011) sau estul îndepărtat al Rusiei (Loboda et al. 2009).

Zonarea hazardului incendiilor de pădure este adesea o sarcină dificilă din cauza complexităţii apariţiei incendiilor pe mai multe scări spaţio-temporale (Keane şi Menakis 2014). Hazardul incendiilor de pădure a fost estimat printr-o varietate de abordări, inclusiv prin comportamentul previzionat la incendiu (Hessburg et al. 2007), distribuţia spaţială a combustibililor (Keane et al. 2010), indecşii de teledetecţie (Jurdao et al. 2012, Pan et al. 2016), variabilele topografice (Yool et al. 1985), expertiza de specialitate (Gonzalez et al. 2007), variabilele socio-economice (Koutsias et al. 2005) şi parametrii de comportament ai incendiilor (Fiedler et al. 2001). Unii autori au estimat hazardul incendiilor de pădure prin crearea unor straturi GIS cu diverse caracteristici şi le-au fuzionat prin utilizarea factorilor ponderaţi pentru a crea un strat final al hazardului incendiilor de pădure (Klaver et al. 1998).

Recent, dezvoltarea şi perfecţionarea substanţială a instrumentelor de analiză a riscurilor la incendii au avut ca rezultat îmbunătăţiri de software, integrare de sisteme, o mai mare disponibilitate a datelor, toate conducând la îmbunătăţirea tehnicilor de analiză statistică şi GIS (Mitsopoulos et al. 2016).

Cea mai comună abordare pentru a înţelege producerea spaţială a incendiilor şi forţele motrice este **modelarea distribuţiei pe baza locaţiilor incendiilor istorice** (Massada et al. 2012). Deosebit de important este faptul că trebuie să existe o distincţie între cele două etape majore ale modelării incendiilor: **modelarea explicativă** (pentru a testa ipotezele privind rolul pe care îl joacă diferiţi factori în declanşarea aprinderilor) şi **modelarea predictivă** (pentru a identifica acele zone care sunt cel mai predispuşe la aprinderi şi unde pot fi alocate eforturile pentru prevenirea incendiilor sau aplicarea de tratamente de reducere a combustibilului).

Conceptual şi metodologic, modelarea distribuţiei incendiilor este strâns înrudită cu modelarea distribuţiei speciilor (Franklin 2010, Massada et al. 2012, Mundo et al. 2013). Abordarea de bază este de a analiza locaţiile de aprindere a focului (similare locaţiilor de prezenţă a speciilor) în raport cu variabilele de mediu suspectate în ceea ce priveşte influenţa acestora asupra distribuţiei spaţiale a incendiilor (sau a prezenţei speciilor). Modelele existente estimează răspunsul la declanşarea unor incendii (sau a speciilor) la aceste variabile predictive de mediu. Ca şi în modelarea distribuţiei speciilor, există două tipuri de date de aprindere care pot fi analizate şi anume: *prezenţa* (aparitia unui eveniment de aprindere într-un punct în spaţiu) sau *abundenţa* (numărul de aprinderi pe unitatea de suprafaţă). Tipul de date afectează alegerea tipului de model deoarece datele de prezenţă necesită de obicei un răspuns binomial, în timp ce datele despre abundenţă necesită un răspuns continuu. Mai mult, deşi datele privind prezenţa sunt adesea însoţite de date privind absenţa, au fost dezvoltate şi metode speciale de modelare bazate doar pe datele de prezenţă în situaţiile în care locaţiile de prezenţă sunt comparate cu condiţiile de mediu de fond ("utilizate vs. disponibile") (Elith et al. 2010), deoarece este adesea imposibil să se identifice locurile unde nu se pot produce incendii.

Există mai multe metode care investighează interacţiunile dintre variabilele spaţiale (suspectate ca factori favorizanţi) şi apariţia incendiilor. Astfel, modele de regresie liniară generalizate (GLM), cum ar fi **regresia liniară şi logistică** (Catry et al. 2009, Chuvieco et al. 2010, Oliveira et al. 2012) precum şi **metode de clasificare şi regresie arborescente** (*classification and regression trees* - CART) (Amatulli et al. 2006, Archibald et al. 2009) au fost utilizate pe scară largă. Aceste metode se concentrează pe imaginea globală şi sunt caracterizate prin ipoteze spaţiale staţionare, ceea ce adesea, nu este cazul în situaţii reale (Koutsias et al. 2010, Sá et al., 2011). În opinia unor cercetători (Archibald et al. 2009, Ganteaume şi Jappiot 2013) importanţa variabilelor care explică apariţia incendiilor nu este omogenă de-a lungul întregii suprafeţe analizate, fiind necesare pentru

identificarea factorilor spațiali locali care guvernează regimul incendiilor de pădure, mai multe metode de analiză (Koutsias et al. 2010, Sá et al., 2011). Neomogenitatea spațială a variabilelor a fost verificată prin utilizarea **metodei regresiei ponderate geografic** (*Geographically Weighted Regression - GWR*) (Fotheringham et al. 2002). GWR generează câte o ecuație de regresie pentru fiecare caracteristică analizată dintr-un set de date eșantion ca un mijloc de a aborda variația spațială (Guo et al. 2016). Cu toate acestea, GWR se concentrează mai mult pe analiza și interpretarea datelor exploratorii decât pe predicție (Oliveira et al. 2014, Nunes et al. 2016).

Alte metode statistice avansate, care au fost adesea folosite pentru modelarea probabilității de apariție și a hazardului incendiilor de pădure implică **utilizarea tehnicilor de învățare automată** (*machine learning*). Oliveira et al. (2012) au comparat capacitatea de predicție a celor două modele (**regresie liniară și tehnica *Random Forest***) pentru a identifica factorii principali care explică probabilitatea de apariție a incendiilor la scară europeană. Satir et al. (2015) au realizat hărți de probabilitate a incendiilor de pădure pentru o pădure mediteraneeană din Turcia, prin utilizarea unei **rețele neuronale artificiale** (ANN), în timp ce Dlamini (2010) a folosit **algoritmul automat de învățare așteptare-maximizare** (EM) pentru a genera o hartă a zonei de apariție a incendiilor bazată pe 13 variabile explicative biofizice și socio-economice folosind o rețea de tip Bayesian (BN). Modelele spațiale care influențează apariția incendiilor provocate de om au fost analizate cu ajutorul funcțiilor K și a **estimatorului kernel al densității** (Guo et al. 2015). Massada et al. (2012) au comparat performanța de predicție, importanța variabilelor și a modelelor spațiale ale metodelor GLM, *Random Forest* și cea a **entropiei maxime** (MaxEnt) în vederea modelării hazardului incendiilor de pădure și au constatat că metoda *Random Forest* și *MaxEnt* au oferit precizii de predicție puțin mai ridicate decât cea rezultată în urma aplicării metodei GLM, în condițiile în care modelul de ajustare a fost similar pentru toate cele trei metode. Alți autori au folosit o teorie a mulțimilor de tip **fuzzy integrat** cu un algoritm de luare a deciziilor într-un cadru GIS pentru a cartografi hazardul incendiilor de pădure (Vadrevu et al. 2010).

În România, conform "Planului Național de Management al Riscurilor de Dezastre" (IGSU 2020), riscul la incendiile de pădure este unul dintre cele mai ridicate din punctul de vedere al probabilității de manifestare dar nivelul impactului este redus în comparație cu alte tipuri de riscuri. Analizat unilateral, impactul produs în urma incendiilor de pădure nu este similar celor rezultate în urma manifestării altor tipuri de risc, putând fi considerat cifric, chiar mai mic. Însă, analizată pădurea în interdependența ei cu mediul, cu viața economico-socială, cu dezvoltarea durabilă a societății, atunci se poate aprecia cu justete că un incendiu de pădure are un impact major asupra dezvoltării societății umane. Totuși, se remarcă o tendință de exacerbare a manifestării incendiilor de pădure, începând cu anul 2000 (de când se constată o creștere a frecvenței anilor cu manifestări extreme a acestui fenomen). Astfel, au fost analizate incendiile istorice și s-a evidențiat dublarea incidenței incendiilor de pădure în România precum și a suprafețelor afectate în perioada 2006-2015 comparativ cu perioada 1956-2015 (Lorenț et al. 2018).

Un pas important în îmbunătățirea gestionării riscului la incendii de pădure a fost realizat în cadrul proiectului SIPOCA 395 „Implementarea și dezvoltarea de sisteme și standarde comune pentru optimizarea proceselor decizionale în domeniul apelor și pădurilor, aplicarea sistemului de politici bazate pe dovezi în Ministerul Apelor și Pădurilor pentru sistematizarea și simplificarea legislației din domeniul apelor și realizarea unor proceduri simplificate pentru reducerea poverii administrative pentru mediul de afaceri în domeniul silviculturii” implementat de INCDS “Marin Drăcea” în perioada 2018-2021 în cadrul căruia procedura și Ghidul de bune practici nr. 8 “Apărarea pădurilor împotriva incendiilor” au fost destinate revizuirii și actualizării actualei Norme tehnice silvice 8 privind *Prevenirea și stingerea incendiilor în fondul forestier*.

Cercetările privind aplicarea tehnologiilor spațiale în studiul incendiilor de pădure în țara noastră sunt încă într-un stadiu incipient, însă recent subiectul a început să atragă comunitatea științifică românească. Mihai et al. 2019 au evaluat posibilitatea de utilizare a imaginilor satelitare Sentinel 2 MSI și Pleiades 1B pentru producerea și evaluarea indicilor spectrali reprezentativi în determinarea susceptibilității la incendiu în păduri de *Pinus nigra ssp. Banatica* și *Fagus sylvatica* într-o zonă din Parcul Național Domogled – Valea Cernei. Banu et al. 2014 au realizat o cartografiere a riscului de aprindere a incendiilor pe baza unui indice combinat care ia în considerare variabile referitoare la expoziție, altitudine, pantă, umiditatea vegetației, distanța față de drumuri și apropierea de așezări. Cercetările au vizat de asemenea Parcul Național Domogled – Valea Cernei.

2. SCOPUL ȘI OBIECTIVELE CERCETĂRILOR

Cunoașterea cauzelor incendiilor de pădure și a principalilor factori care determină declanșarea acestora reprezintă un pas indispensabil în elaborarea de politici și măsuri eficiente de prevenire a acestora și care să ajute la planificarea măsurilor tehnice de prevenire la nivel regional, sporirea eficacității și eficienței economice a intervențiilor de stingere a incendiilor de vegetație precum și creșterea nivelului de pregătire al populației la astfel de dezastre. În acest sens, **scopul** cercetărilor efectuate cu ocazia elaborării tezei de doctorat intitulată “Utilizarea tehnologiilor geospațiale pentru modelarea hazardului la incendii de pădure și analiza factorilor favorizanți” îl constituie **creșterea gradului de prevenție și de atenuare a efectelor incendiilor de pădure în România prin dezvoltarea de metode de analiză geo-spațiale care să fie operaționale în procesele de evaluare periodică după procedee moderne și standardizate a hazardului la incendiile de pădure.**

În vederea realizării scopului cercetărilor întreprinse, **obiectivele** științifice se referă în principal la:

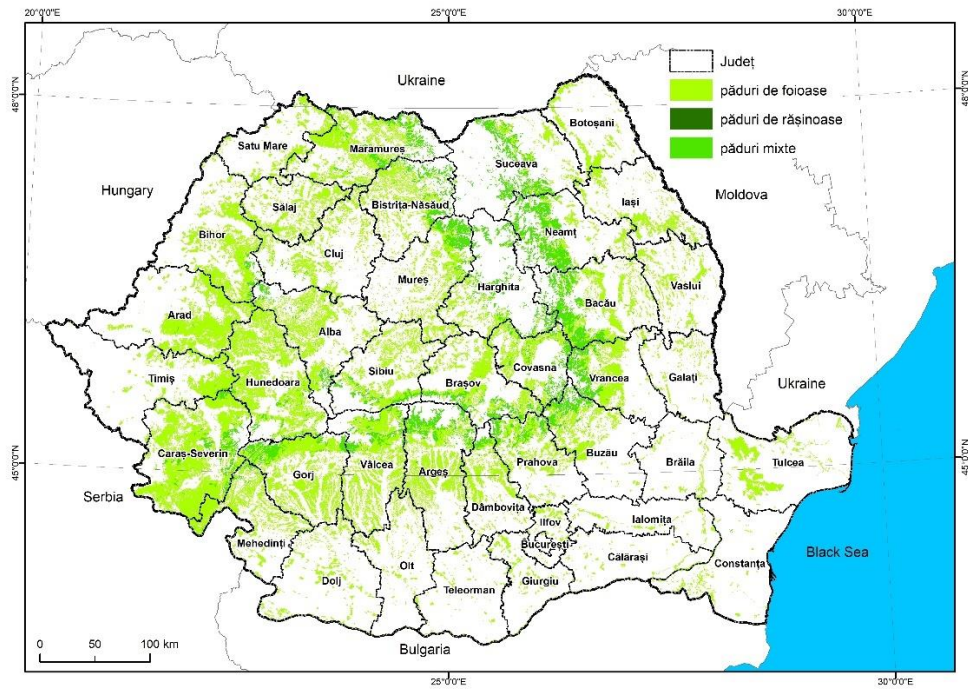
- Cartarea distribuției tipurilor de combustibili pentru suprafețele acoperite cu vegetație din România
- Testarea și validarea unor metode geo-spațiale pentru zonarea hazardului la incendii de pădure și identificarea și analiza factorilor determinanți pentru apariția acestora
- Elaborarea unei metode pentru determinarea suprafeței afectate de incendiu, pe baza imaginilor satelitare de înaltă rezoluție spațială, și evaluarea severității incendiului
- Detectarea și localizarea incendiilor de pădure și urmărirea evoluției acestora pe baza imaginilor satelitare de înaltă rezoluție temporală.

Realizarea acestor obiective contribuie la aprofundarea și dezvoltarea cunoștințelor în ceea ce privește distribuția spațială a incendiilor forestiere din România, cauzele determinante și impactul acestora pentru cunoașterea influenței celor mai importanți parametri geospațiali care conduc la apariția acestora în regiune.

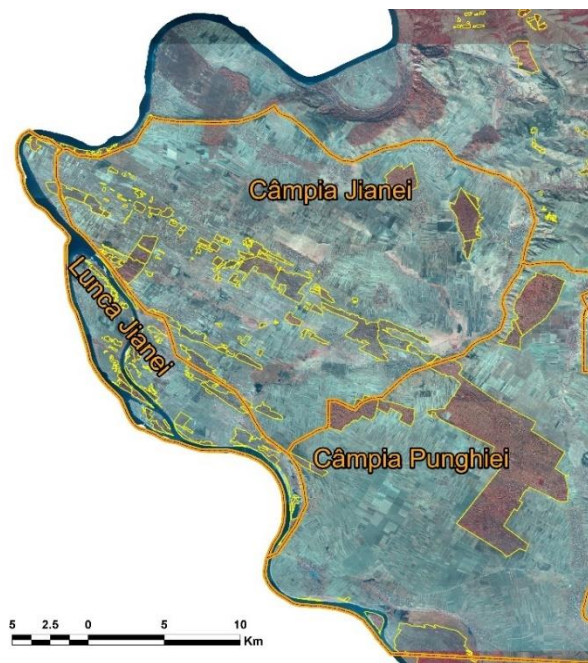
3. METODA ȘI MATERIALUL DE CERCETARE

3.1 Localizarea Cercetărilor

Cercetările efectuate în vederea cartării distribuției tipurilor de combustibili, identificării și analizei factorilor favorizanți la incendiile de pădure precum și zonării hazardului au fost localizate pe întreg teritoriul al României iar determinarea suprafețelor afectate de incendii pe baza imaginilor satelitare și a urmării propagării acestora în timp s-a realizat pe raza comunelor Jiana și Pătulele din județul Mehedinți, în trupuri de pădure administrate de Ocolul Silvic Renașterea Pădurii și Ocolul Silvic Vînju Mare (Figura 3.1).



a)



b)

Figura 3.1. Localizarea cercetărilor: a) teritoriul României – pentru cartarea combustibililor vegetali și analiza de hazard și b) o zonă împădurită din raza comunelor Jiana și Pătulele din județul Mehedinţi

3.2 Cartarea distribuţiei tipurilor de combustibili pentru suprafeţele acoperite cu vegetaţie din România

În cadrul cercetărilor efectuate cu ocazia elaborării tezei de doctorat, cartarea tipurilor de combustibili s-a realizat folosind metoda de cartare indirectă, pe baza seturilor de date geospaţiale cu acoperire pe întreg teritoriul României potrivit căreia speciile / comunităţile de plante sunt

asociate cu combustibili descrişi în termeni de tipuri de vegetaţie (de exemplu, iarbă, arbuşti şi arbori) şi proprietăţi (de exemplu, înălţime, densitate, amestec), iar în cele din urmă sunt cartate tipurile de combustibil folosind diferite tehnici de analiză a imaginii (Tănase & Gitas, 2008).

În urma analizării sistemelor de clasificare a tipurilor de combustibil existente la nivel european cum ar fi FUELMAP sau ArcFuel (Toukiloglou et al. 2013), s-a constatat că acestea poate fi adaptate şi particularizate pentru teritoriul României. Astfel, au fost preluate principalele grupe de combustibil: pajişti, arbuşti, zone de tranziţie între arbuşti şi arbori, păduri de conifere, păduri de foioase, păduri mixte, vegetaţie acvatică, terenuri agro-forestiere şi s-au identificat grupele şi tipurile de combustibil specifice României. Grupele de combustibili reprezentând vegetaţia non-forestieră au fost stabilite dintre clasele de acoperire a terenului din care incendiul se poate propaga în suprafeţele acoperite cu pădure deci, au fost extrase din terenurile acoperite cu vegetaţie arbustivă, vegetaţie ierboasă sau zone de tranziţie între arbuşti şi pădure.

Prin clasificarea tipurilor de litieră specifice ecosistemelor forestiere pe baza proprietăţile lor de combustibilitate distincte, se poate obţine o hartă a tipurilor de combustibili de suprafaţă (de litieră) pentru suprafeţele împădurite. Aceasta este o metodă simplificată şi expeditivă dar care, cu toate acestea oferă un grad de informaţie în plus în cazul utilizării de modele de propagare a focului, deoarece tipurile de ecosisteme sunt grupate în funcţie de caracteristicile pirotehnice care influenţează viteza şi modul de răspândire ale unui incendiu de suprafaţă.

În acest sens, pentru clasificarea ecosistemelor pe grupe de combustibilitate, în funcţie de litieră, s-au utilizat studii deja elaborate, care s-au bazat pe metoda directă, respectiv măsurători directe în teren. Primul studiu luat în considerare a fost cel realizat de Dimitrakopoulos (2002) care a realizat o clasificare a vegetaţiei mediteraneene a Greciei în tipuri de combustibili. Lucrarea, deşi abordează un complex ecosistemic cu diferenţe semnificative faţă de cel din ţara noastră, oferă detalii importante cu privire la tipurile de combustibili din arborete de pinete şi de cvercinee. Pentru completare s-a utilizat şi studiul elaborat de către Scott şi Burgan (2005), care au dezvoltat unui nou set de modele de combustibilitate pentru modelarea comportamentului la foc pentru vegetaţia specifică Americii de Nord precum şi informaţiile ştiinţifice privind managementul riscului de incendiu la păduri care oferă o descriere detaliată a incendiilor de pădure produse în judeţul Suceava în perioada 1990-2009 (Burlui, 2013), mai ales la modul de manifestare a incendiilor de litieră în funcţie de compoziţia arboretului.

În urma consultării acestor lucrări ştiinţifice s-a stabilit că incendiile de pădure de suprafaţă prezintă specificităţi în determinate de tipul de litieră existentă în arboret, acestea fiind grupate în cinci clase principale: litieră de răşinoase, litieră de cvercinee xerofite (stejar pufos, stejar brumăriu), litieră de cvercinee mezofite (stejar, gorun), litieră de alte specii de foioase. Pentru cartarea acestora s-a utilizat Harta pădurilor pe unităţi ecosistemice (Doniţă et al. 2008). Gruparea tipurilor de ecosisteme în clase de combustibili s-a realizat în stratul vectorial de tip poligon conţinând distribuţia tipurilor de ecosisteme forestiere, după care s-a realizat conversia din vector în raster cu rezoluţia de 30 m.

În continuare, fiecare tip de combustibil forestier a fost subdivizat în funcţie de procentul de acoperire cu arbori ştiindu-se faptul că zonele cu vegetaţie densă au mai multă materie combustibilă decât cele rare şi, prin urmare, densitatea vegetaţiei este una dintre proprietăţile fizice importante ale combustibilului.

În acest sens s-a utilizat produsul MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), Colecția 6, Vegetation Continuous Fields (VCF) cunoscut sub denumirea de MOD44B. Produsul oferă estimări la nivel global la nivel de sub-pixel cu rezoluția de 250 m a procentului de acoperire cu arbori care este derivat pe baza datelor de emisie și reflexie înregistrate de instrumentul satelitar MODIS. Aceste date sunt produse cu o periodicitate de 1 an. Pentru analiza de față au fost descărcate datele aferente anului 2020.

Grupele de combustibili reprezentând vegetația non-forestieră (i.e. terenurile acoperite cu vegetație arbustivă, vegetație ierboasă sau zone de tranziție între arbuști și pădure) au fost extrase din setul de date Corine Land Cover 2018.

În final s-au obținut 20 de tipuri de combustibili și a fost realizată harta distribuției acestora la nivel național. Fiecare tip de combustibil reprezintă în același timp un model de combustibil întrucât reprezintă „o asociere identificabilă a elementelor de combustibilitate aparținând unor specii distinctive: formă, mărime, continuitate, care vor prezenta un comportament caracteristic la foc în condiții de ardere definite” (Merrill și Alexander, 1987).

3.3 Determinarea hazardului la incendii de pădure și analiza factorilor favorizanți ai acestora

Pentru modelarea distribuției incendiilor cea mai utilizată abordare constă în analiza evenimentelor istorice de incendiu pentru identificarea locațiilor de aprindere a focului în raport cu variabilele suspectate care influențează distribuția spațială a incendiilor. Modelele existente estimează răspunsul la declanșarea incendiilor la aceste variabile predictive. Prin urmare, prima etapă din cadrul cercetărilor a constituit-o realizarea unei baze de date geo-spațiale în care să fie integrate seturile de date care vor alimenta modelele statistice testate ulterior.

Ca variabilă dependentă s-au utilizat informațiile din **baza de date cu incendiile de pădure înregistrate în România în perioada 2006-2018**. Aceasta conține evidențe detaliate privind incendiile de pădure și au fost obținute pentru perioada 2006-2015 de la Regia Națională a Pădurilor (RNP) ROMSILVA pentru pădurile proprietate publică a statului și pentru pădurile proprietate privată administrate de RNP, iar pentru perioada 2011-2018 au fost obținute evidențele de incendii centralizate de către Ministerul Mediului, Apelor și Pădurilor (MMA) pentru întregul fond forestier național. Baza de date conține un număr de 4220 de incendii care au fost geolocalizate pe baza hărților amenajistice georeferențiate, dat fiind că evidențele originale nu conțineau coordonatele geografice ale incendiilor, localizarea lor fiind înregistrată prin precizarea unităților amenajistice afectate de incendiu. Evidențele tabelare cuprind informații referitoare la *localizarea incendiului, suprafața afectată, durata incendiului, informații referitoare la forțele de intervenție mobilizate pentru stingerea acestuia* (ingineri silvici, pompieri, poliție și jandarmi, respectiv cetățeni), *pagube produse* (date parțiale), *cauza producerii* (conform nomenclatorului EFFIS) cât și *informații referitoare la zona geografică* (ex: câmpie, deal, munte etc), natura pădurii (ex : rășinoase, foioase, amestec, plantație etc.) și tipul incendiului (ex.: de litieră, de litieră și coronament).

Cea mai comună abordare pentru a înțelege producerea spațială a incendiilor și forțele motrice este *modelarea distribuției pe baza locațiilor incendiilor istorice* (Massada et al. 2012). În cadrul cercetărilor au fost testate două modele predictive pentru a identifica acele zone care sunt cel mai predispuse la aprinderi și unde pot fi alocate eforturile pentru prevenirea incendiilor sau aplicarea de tratamente de reducere a combustibilului. Au fost testate două metode predictive (**Random**

Forest și regresia logistică) care permit reprezentarea spațială a zonelor predispușe la incendii, respectiv *zonarea hazardului*, concomitent cu punerea în evidență a factorilor care influențează cel mai mult producerea incendiilor de pădure. Analiza s-a realizat prin urmare la nivel de raster, pe întreg teritoriul de studiu (i.e. teritoriul României).

Random forest (RF) este un model non-parametric derivat din arbori de clasificare și regresie (CART) care stabilește arbori de decizie multipli, folosind un subset selectat aleatoriu de eşantioane și variabile de antrenament (Belgiu și Drăguț, 2016). RF constă dintr-o combinație de arbori, unde fiecare arbore este generat de eşantioane *boot-strap*, lăsând aproximativ o treime din eşantionul total pentru validare (*out-of-the-bag predictions*). Fiecare divizare a arborelui este determinată utilizând un subset aleatoriu de predictorii la fiecare nod. Rezultatul final este media rezultatelor tuturor arborilor. Această metodă a fost aplicată în studii ecologice (Cutler et al. 2007), unde a asigurat atât o precizie ridicată cât și capacitate ridicată de a modela interacțiuni complexe între variabile. În plus, având în vedere că folosește eşantioane *out-of-the-bag* (observații independente de cele utilizate pentru creșterea arborelui) pentru a calcula ecartul erorii și importanța variabilelor, nu sunt necesare date test sau validare încrucișată. Cu toate acestea, metoda se comportă ca o "cutie neagră", deoarece arborii individuali nu pot fi examinați separat și nu calculează coeficienții de regresie și nici intervalele de încredere (Cutler et al. 2007). Totuși, aceasta permite calcularea importanței variabilelor care poate fi comparată cu alte tehnici de regresie (Oliveira et al. 2012).

Modelarea prin regresie logistică este utilizată pentru determinarea unei variabile dihotomice Y dintr-un set de variabile predictive independente prin estimarea probabilității de producere a evenimentului. Principala ipoteză de lucru a unui model de regresie logistică este legătura liniară dintre logaritmul natural al cotelor rezultantei binare (Y ia valorile 1 și 0) și variabilele independente. În contrast cu alte metode statistice multivariate, nu trebuie dovedită nicio ipoteză de normalitate multivariată.

Regresiile logistice pot fi utile pentru clasificarea datelor de teledetecție, în special atunci când variabilele independente nu urmează o distribuție normală. Principala cerință în implementarea modelului regresiei logistice în procesul de clasificare este aceea de a exprima problema clasificării într-o manieră dihotomică binară, i.e. de a analiza categoriile clasificării câte două de fiecare dată. Ecuația regresiei logistice se exprimă după cum urmează:

$$p_i = P(z_k(x_i)|Y = 1) = \frac{\exp\left(\beta_0 + \sum_{k=1}^K \beta_k z_k(x_i)\right)}{1 + \exp\left(\beta_0 + \sum_{k=1}^K \beta_k z_k(x_i)\right)} \quad (3.1)$$

unde,

- p_i reprezintă probabilitatea de producere a unui incendiu în celula i ,
- β_0, β_k sunt coeficienți de regresie determinați pentru ponderarea variabilelor explicative x_i .

3.4 Evaluarea efectelor post-incendiu pe baza imaginilor și produselor satelitare de înaltă rezoluție spațială

Zona de cercetare se află în sud-vestul României, în județul Mehedinți (Figura 1), fiind acoperită în principal de păduri de salcâm instalate pe dunele râului în terasa înaltă a Dunării, unde pădurile alternează cu terenuri agricole cultivate sau necultivate. În condiții de secetă prelungită și vânt puternic, în perioada august - septembrie 2021, aceste incendii repetate de ardere a miriștilor s-au extins în pădurile din apropiere, rezultând în mii de hectare de câmpuri agricole și păduri afectate în diverse grade.

Pentru evaluarea efectelor post-incendiu au fost utilizate imaginii satelitare oferite de sateliții Sentinel 2 care sunt echipați cu un captor-senzor de colectare a imaginilor suprafeței terestre denumit *MultiSpectral Imager* (MSI), de tip *push-broom*, multispectral cu 13 benzi spectrale care înregistrează imagini pe o bandă lată de 290 km sub satelit (stânga-dreapta față de nadir). Rezoluția spațială este diferită pentru cele 13 benzi, de la 10 m pentru benzile 2,3,4 și 8 (vizibil și NIR), 20m pentru benzile 5,6,7,8a,11 și 12 (benzi în zona "red edge" și SWIR) și 60 m pentru benzile 1, 9, și 10 (benzi de corecție atmosferică).

Pentru a evalua gradul de deteriorare al arboretelor după incendiu, s-a adoptat o metodologie de estimare a severității incendiilor forestiere folosind imagini înregistrate înainte, în timpul și după evenimentele de incendiu. În plus, s-au utilizat ortoimagini aeriene realizate Agenția Națională de Cadastru și Publicitate Imobiliară (ANCPPI) în culori naturale RGB și infraroșu color CIR, capturate în 2015 cu o cameră ADS80, cu o rezoluție spațială de 0.5 m, împreună cu ortoimagini de ultra-înaltă rezoluție obținute prin procesarea imaginilor aeriene RGB capturate cu o dronă DJI Mavic 2 Enterprise Dual, aproximativ o lună după evenimentele de incendiu. Imaginile Sentinel 2 au fost descărcate de pe portalul Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>). Un total de 9 imagini de nivel de procesare S2 L2A, (imagini ortorectificate și corectate atmosferic – Bottom-Of-Atmosphere) au fost obținute și utilizate în cadrul studiului, acoperind perioada dintre 1 august și 11 septembrie 2021, în care au avut loc cele mai multe incendii forestiere. Toate imaginile au fost grupate pe benzi (cu excepția benzilor B1, B9 și B10), decupate pentru zona de studiu și reproiectate în proiecția Stereografic 1970. Pentru o evaluare rapidă au fost selectate două imagini, una înainte de seria de incendii (2021-08-01) și alta după ce incendiile s-au încheiat (2021-08-11) (Figura 3.2). Au fost descărcate în total 9 imagini Sentinel 2 înregistrate în zilele de: 01.08.2021, 04.08.2021, 06.08.2021, 11.08.2021, 19.08.2021, 24.08.2021, 03.09.2021, 08.09.2021.

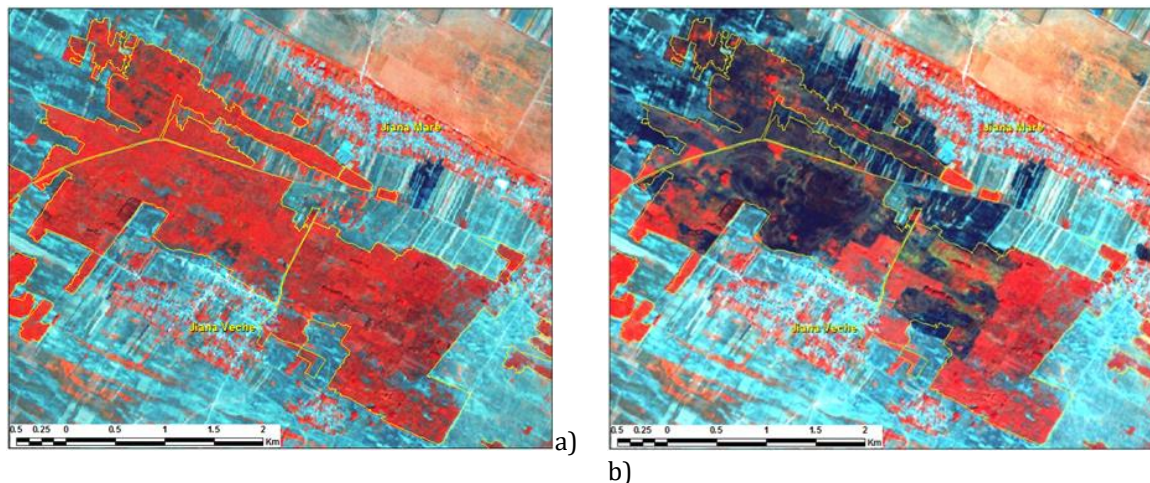


Figura 3.2. Imagini Sentinel 2 din zona de studiu: 2021-08-01 (a) înainte de evenimentele de incendiu, 2021-08-11 (b) după evenimentele de incendiu. Combinația de culori: RGB = B8, B3, B2. Linie galbenă - limitele pădurii (trupul de pădure Jiana, județul Mehedinți)

Rapoartele de incidențe privind incendiile forestiere au fost obținute de la Ministerul Mediului, Apelor și Pădurilor (MMAP). În total, au fost înregistrate 11 evenimente de incendiu de pădure în august 2021 în zona de studiu, afectând un total de 611,85 hectare de pădure. Amenajamentele silvice și hărțile aferente au fost utilizate pentru a oferi informații despre caracteristicile arboretelor și pentru a delimita unitățile amenajistice afectate de incendii.

În vederea stabilirii gradului de afectare a arboretelor s-a elaborat o scară de severitate destinată să sistematizeze și standardizeze modul de evaluare a acestora în funcție de efectele vizibile pe teren și pe imagini aeriene asupra arboretului, stratificate după vârsta arboretului și indicele de acoperire al coronamentului. Astfel, după cartarea preliminară a severității incendiilor bazată pe imaginile satelitare, s-a efectuat o deplasare în teren (în trupurile de pădure Jiana și Pătulele) pentru a verifica dacă clasele de severitate realizate în mod automat corespund impactului real al incendiilor. În acest scop, s-au identificat pe harta de severitate 40 de locații cu diferite grade de severitate și caracteristici diferite în ceea ce privește înălțimea și acoperirea coroanei. Colectarea datelor de teren s-a desfășurat în luna octombrie 2021, la o lună după ce au avut loc incendiile forestiere.

Severitatea arderii reprezintă gradul sau amploarea schimbării mediului cauzată de incendiu. Schimbarea poate fi reprezentată de variabile biofizice simple sau multiple pe o scară continuă de la inexistența acesteia până la schimbări majore. Pentru estimarea în teren a severității incendiului, au fost luate în considerare 5 clase de severitate, similare cu cele propuse de Key C.H și Benson N.C., 2006: *arboret neafectat*, *severitate joasă*, *mijlocie-joasă*, *mijlocie-înaltă* și *înaltă*. Severitatea incendiului a fost evaluată vizual în teren pentru cele patru straturi: substrat, ierburi și tufărișuri joase, tufărișuri înalte și arbori tineri (< 10m H) și arbori maturi (> 10m H), atribuind o valoare cuprinsă între 0 (neafectat) și 4 (severitate ridicată). Așadar, au fost amplasate în teren cele 40 de suprafețe de probă reprezentative de formă pătrată (20x20 m) (Figura 3.3). Clasele de severitate au fost adaptate la specificul pădurilor de salcâm din regiunea de studiu și sunt prezentate în Tabelul 3.1.

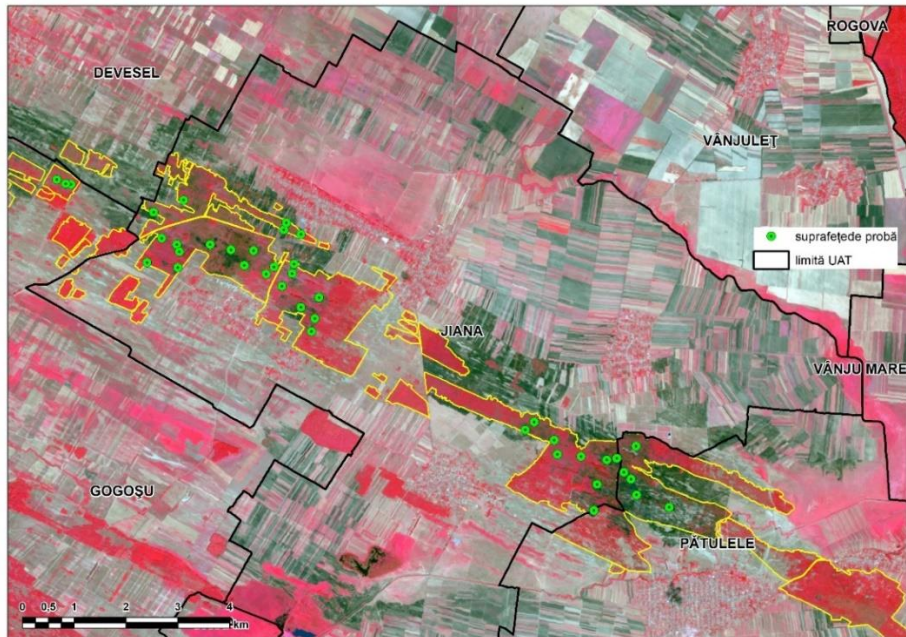


Figura 3.3 Amplasamentul suprafeţelor de probă pentru estimarea severităţii incendiilor în teren

Tabelul 3.1. Criterii de estimare a severităţii incendiilor pe teren

Severitate	Criterii de clasificare pe teren
reduşă	<ul style="list-style-type: none"> • sol neafectat • litieră și semințiș până la 1m afectate • plantații aparent neafectate • arboret scund (tânăr) cu frunziș neafectat • arboret înalt (matur) cu trunchiurile arborilor înnegrite până la 0,5 m
moderat-reduşă	<ul style="list-style-type: none"> • sol parțial afectat • litiera, stratul arbustiv și semințișul afectate • plantații vizibil afectate • arboret scund (tânăr) cu frunziș neafectat • arboret înalt (matur) cu trunchiuri înnegrite până la 1 m
moderat-ridicăță	<ul style="list-style-type: none"> • strat organic din sol carbonizat • litiera, stratul arbustiv și semințișul carbonizate • plantații carbonizate, posibilă revenire doar în urma recepării • arboret scund (tânăr) cu frunzișul parțial uscat sau ars • arboret înalt (matur) cu trunchiuri înnegrite până la 2 m
înaltă	<ul style="list-style-type: none"> • strat organic din sol transformat în cenușă • litiera, stratul arbustiv și semințișul transformate în cenușă • plantații transformate în cenușă • arboret scund (tânăr) cu frunzișul uscat sau ars, trunchiuri carbonizate • arboret înalt (matur) cu trunchiuri înnegrite peste 2 m, frunziș parțial uscat sau ars

La etapa de birou s-a ținut cont că arboretul reflectă radiațiile electromagnetice în spectrul verde și infraroșu apropiat, deci cu cât acestea sunt mai reduse, cu atât gradul de afectare este mai ridicat. Ținând cont de textura imaginii, care a fost analizată vizual, arboretele au fost clasificate și ca terenuri goale, plantații, arboret tânăr și arboret matur precum și s-a estimat indicele de acoperire.

S-au luat în considerare trei tipuri de arboret (plantație, arboret scund sub 10 m înălțime, arboret înalt peste 10 m înălțime), vulnerabilitatea lor la incendii de suprafață fiind invers proporțională cu înălțimea și 4 categorii de mărime a indicelui de acoperire (fără coronament, redus 0,1-0,3, mediu 0,4-0,6 și ridicat 0,7-1,0), acestea fiind necesare pentru corectarea severității.

3.5 Prelucrarea imaginilor satelitare

Imaginile originale georeferențiate sunt cele furnizate de ESA, în proiecție cartografică UTM pe elipsoid WGS84. Pentru a putea fi suprapuse cu datele geospațiale utilizate în România a fost necesară reproiectarea în proiecția cartografică Stereografic 1970. Astfel, s-a procedat la crearea fișierelor multispectrale în care se introduc fișierele cu benzile spectrale originale și s-a trecut de la formatul *JPEG 2000* la formatul *TIFF*. De asemenea, imaginile utilizate au fost decupate din *tile*-ul original astfel încât să corespundă cu suprafața zonei de studiu. Toate aceste operațiuni au fost realizate cu ajutorul programării obiect disponibile în sistemul ArcGIS, prin utilizarea *ModelBuilder* (Figura 3.4).

Stabilirea indicilor spectrali pentru determinarea suprafeței afectate de incendii de pădure și a severității acestora

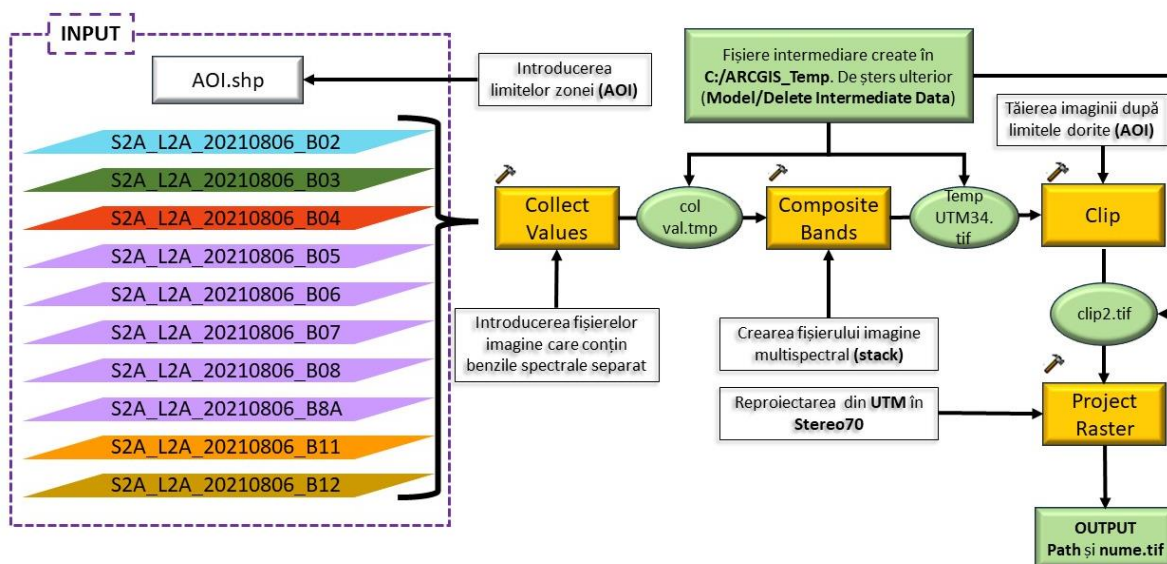


Figura 3.4. Modelul de prelucrare preliminară automată a imaginilor Sentinel 2 (MSI) în sistemul ArcGIS

Din literatura de specialitate au fost reținuți mai mulți indici care pot fi utilizați pentru determinarea suprafețelor afectate de incendii de pădure și pentru evaluarea gradului de severitate al efectelor. Astfel, au fost testați indicii consemnați de (Mallinis et al. (2017) ca fiind susceptibili pentru evidențierea suprafețelor afectate de incendii, fiind adaptați la benzile spectrale ale sensorului MSI de pe sateliții Sentinel 2 (Tabelul 3.2).

Tabelul 3.2. Indici spectrali utilizați pentru evaluarea efectelor incendiilor forestiere (adaptare după Mallinis et al., 2017)

Indexul spectral	Abrevierea	Formula de calcul
Normalized Burn Ratio <i>Raportul Normalizat al Arderii</i>	NBR	$\frac{\text{Band8}-\text{Band12}}{\text{Band8}+\text{Band12}}$
Normalized Burn Ratio narrow	NBR _n	$\frac{\text{Band8A}-\text{Band12}}{\text{Band8A}+\text{Band12}}$
Normalized Difference Vegetation Index <i>Indicele diferențial normalizat al vegetației</i>	NDVI	$\frac{\text{Band8}-\text{Band4}}{\text{Band8}+\text{Band4}}$
Green Normalized Difference Vegetation Index	GNDVI	$\frac{\text{Band5}-\text{Band3}}{\text{Band5}+\text{Band3}}$
Normalized Difference Vegetation Index red-edge 1	NDVI _{RE1}	$\frac{\text{Band8}-\text{Band5}}{\text{Band8}+\text{Band5}}$
Normalized Difference Vegetation Index red-edge1 narrow	NDVI _{RE1n}	$\frac{\text{Band8A}-\text{Band5}}{\text{Band8A}+\text{Band5}}$
Chlorophyll Index red-edge	CI _{RE1}	$\frac{\text{Band7}}{\text{Band5}} - 1$
Modified Simple Ratio red-edge	MSR _{RE1}	$\frac{\left(\frac{\text{Band8}}{\text{Band5}}\right) - 1}{\sqrt{\left(\frac{\text{Band8}}{\text{Band5}}\right) + 1}}$
Modified Simple Ratio red-edge narrow	MSR _{RE1n}	$\frac{\left(\frac{\text{Band8A}}{\text{Band5}}\right) - 1}{\sqrt{\left(\frac{\text{Band8A}}{\text{Band5}}\right) + 1}}$

Suplimentar acestor indici, care se calculează pentru o anumită imagine (indici mono temporali), au fost stabiliți indici bitemporali, utilizându-se două imagini, una înainte de eveniment (în acest caz incendiu) și una post eveniment (Tabelul 3.3).

Tabelul 3.3. Indici spectrali bitemporali utilizați pentru evaluarea efectelor incendiilor forestiere (adaptare după Mallinis et al, 2017)

Indicele spectral	Abrevierea	Formula de calcul
Differenced Normalized Burn Ratio <i>Raportul Diferențial Normalizat al Arderii</i>	dNBR	prefireNBR - postfireNBR
Differenced Normalized Burn Ratio narrow	dNBR _n	prefireNBR _n - postfireNBR _n
Relative differenced Normalized Burn Ratio	RdNBR	$\frac{dNBR}{\sqrt{\left \frac{\text{prefireNBR}}{1000}\right }}$
Relativized Burn Ratio	RBR	$\frac{dNBR}{\text{PrefireNBR} + 1,001}$

De asemenea se poate utiliza și diferența între NDVI:

$$dNDVI = NDVI_{\text{Pre-fire}} - NDVI_{\text{Post-fire}}$$

sau între oricare alți indici.

Determinarea indicilor pentru detectarea suprafețelor de pădure incendiate

Determinarea nivelului de severitate al incendiului

Pentru stabilirea nivelului de severitate (gradul de afectare) a vegetației în urma incendiului, au fost determinate, potrivit *United States Geological Survey* (USGS), trepte de severitate pe baza valorilor indicelui spectral bitemporal *Differenced Normalized Burn Ratio*, dNBR (Key și Benson, 2006; Lutes et al., 2006) (Tabelul 3.4).

Tabelul 3.4. Nivele de severitate bazate pe indicii dNBR (adaptare după USGS)

Nivelul de severitate	Intervalul valorilor dNBR
Neafectate	-0,100 - +0,099
Severitate joasă	+0,100 - +0,269
Severitate medie-înaltă	+0,270 - +0,439
Severitate medie-ridicată	+0,440 - +0,659
Severitate înaltă	+0,660 - +1,300

Prelucrarea imaginilor s-a realizat cu ajutorul sistemului ERDAS, specializat pentru prelucrări de imagini, în care, cu sistemul de programare obiect numit *Modeler* a fost realizat modelul pentru calculul indicelui *Normalized Burn Ratio* (NBR) (raportul normalizat arderii), adaptat pentru imaginile de tip Sentinel 2.

Pentru fiecare indice folosit s-a definit o astfel de schemă și a fost introdusă formula corespunzătoare.

Pentru a crește precizia hărții efectelor incendiului bazată pe indicii dNBR, a fost produsă o hartă digitală a acoperirii coroanelor și înălțimii arborilor, pe baza imaginilor aeriene colorate cu infraroșu (CIR) cu rezoluție spațială de 0,5 m capturate în 2015. Clasele au fost delimitate prin vectorizare manuală, iar gradele de acoperire a coroanelor și înălțimile au fost stabilite vizual prin foto-interpretare.

Pentru înălțimea arborilor, au fost luate în considerare trei clase, respectiv plantații (cultura artificială de arbori tineri, cu coroana încă în dezvoltare), arbori scunzi (înălțime sub 10 m) și arbori înalți (înălțime peste 10 m). Clasele au fost stabilite după ce s-a constatat în teren că vulnerabilitatea la incendii este invers proporțională cu înălțimea arborilor. Pentru gradul de acoperire al coronamentului au fost stabilite patru categorii: fără coroană, scăzută 0,1-0,3, medie 0,4-0,6 și înaltă 0,7-1,0. Arboretele cu grad de acoperire scăzut al coronamentului par să fie mai grav afectate decât în realitate pe imaginile de satelit.

În arboretele cu grad de acoperire mai scăzut (cum este cazul salcâmetelor) pătura erbacee s-a dezvoltat mai mult, oferind mai mult combustibil pentru ardere, fiind secundată și de o vizibilitate mai mare din aer/spațiu a solului ars. În arboretele dese, care acoperă bine solul (cazul arboretelor cu specii de cvercinee), pătura erbacee și arbuștii sunt slab dezvoltate, astfel ca incendiul de suprafață este alimentat doar de litieră iar coronamentul înfrunzit poate ascunde severitatea reală.

Un caz aparte îl reprezintă plantațiile care sunt foarte vulnerabile din cauza vârstei reduse, cantităților mari de combustibil (iarba înaltă, uscată), care nu prezintă coronament și în care solul incendiat este expus, astfel că severitatea estimată pe imagini aeriene sau satelitare este de obicei supraestimată.

Prezența sau absența frunzișului neafectat de incendiu este factorul care determină ca estimarea severității pe baza imaginilor aeriene/satelitare să fie diferită comparativ cu realitatea de la sol. Aceasta face ca estimarea să fie mai apropiată de realitate în perioadele fără frunziș (*leaf off*) în cazul

foioaselor. S-a propus astfel o cheie de corectare a severităţii estimate pe imagini aeriene/satelitare bazată pe criteriile expuse mai sus (Tabelul 3.5).

Tabelul 3.5. Cheie de corectare a severităţii estimate din imagini satelitare/aeriene

Tip arboret + tendinţa (↑↓)	Indice acoperire + tendinţa (↑↓)	Severitate estimată imagini aeriene/satelit	Corecţie	Severitate teren
Teren Gol ↑	Fără arboret ↑	înaltă	-	-
Plantaţie ↑	Fără coronament ↑	joasă	↑	mijlocie-joasă
		mijlocie-joasă	↑	mijlocie- înaltă
		mijlocie-înaltă	↑	înaltă
		înaltă	↑↓	înaltă
Arboret cu înălţimi ale arborilor sub 10 m ↑	redus 0,1-0,3 ↓	joasă	↑↓	joasă
		mijlocie-joasă	↓	joasă
		mijlocie-înaltă	↓	mijlocie-joasă
		înaltă	↓	mijlocie-înaltă
	mediu 0,4-0,6 ↑↓	joasă	↑↓	joasă
		mijlocie-joasă	↑↓	mijlocie-joasă
		mijlocie-înaltă	↑↓	mijlocie-înaltă
		înaltă	↑↓	înaltă
	ridicat 0,7-1,0 ↓	joasă	↑	mijlocie-joasă
		mijlocie-joasă	↑	mijlocie-înaltă
		mijlocie-înaltă	↑	înaltă
		înaltă	↑↓	înaltă
Arboret cu înălţimi ale arborilor peste 10 m ↓	redus 0,1-0,3 ↓	joasă	↑↓	joasă
		mijlocie-joasă	↓	joasă
		mijlocie-înaltă	↓	mijlocie-joasă
		înaltă	↓	mijlocie-înaltă
	mediu 0,4-0,6 ↑↓	joasă	↓↑	joasă
		mijlocie-joasă	↓	joasă
		mijlocie-înaltă	↓	mijlocie-joasă
		înaltă	↓	mijlocie-înaltă
	ridicat 0,7-1,0 ↓	joasă	↑↓	joasă
		mijlocie-joasă	↑↓	mijlocie-joasă
		mijlocie-înaltă	↑↓	mijlocie-înaltă
		înaltă	↑↓	înaltă

3.6 Detectarea și localizarea incendiilor de pădure și urmărirea evoluției acestora pe baza imaginilor satelitare de înaltă rezoluție temporală

Cercetările s-au desfășurat într-o zonă împădurită situată pe raza comunelor Jiana și Pătulele din județul Mehedinți (Figura 4.1). Astfel, datele privind incendiile de pădure produse în luna august 2021 au fost obținute de la Ocolul Silvic Renașterea Pădurii și Ocolul Silvic Vînju Mare, acestea fiind cele care administrează fondul forestier din trupurile de pădure Jiana și respectiv, Pătulele. Totodată, au fost utilizate evidențele electronice tabelare, care sintetizează rapoartele de incendii pentru anul 2021 furnizate de către MMAP (Tabelul 3.6).

Tabelul 3.6. Centralizarea incendiilor de pădure înregistrate în trupurile de pădure Jiana și Pătulele în perioada 04-14.08.2021 (conform rapoartele de incendiu redactate de către ocoalele silvice și centralizatorul sintetic al incendiilor din 2021 furnizat de MMAP)

Ocol Silvic	Unitate de Producție	u.a.	Compoziție	Vârșă (ani)	Suprafața (ha)	Tip incendiu	Data și ora	
							izbucnire	stingere
Renașterea Pădurii	UP II Burila	89-242%	10 SC	10;12	160,0	litieră	04.08. 2021 15:10	06.08. 2021 12:00
Vînju Mare	IX Burila Mare	82	10 SC	12	4,0	litieră	04.08. 2021 17:00	04.08. 2021 22:00
Vînju Mare	IX Burila Mare	38A-C, 39, 46AC, 50	10 SC	2; 22	43,41	litieră	04.08. 2021 17:00	04.08. 2021 21:30
Renașterea Pădurii	XXIV Mehedinți	292%-300%	10 SC	6; 30	80,0	litieră	06.08. 2021 12:30	07.08. 2021 6:00
Vînju Mare	IX Burila Mare	84A	10 SC	15	10,0	litieră	07.08. 2021 12:00	07.08. 2021 22:15
Greengold Vest SRL	XV	21-30, 37, 38%	foioase	21-30; 37; 38	173,3	litieră	09.08. 2021 14:15	10.08. 2021 -
Vînju Mare	IX Burila Mare	84	10 SC	15	3,24	litieră	09.08. 2021 10:45	09.08. 2021 14:00
Renașterea Pădurii	XXIV Mehedinți	2, 3, 31, 32	10 SC	6; 20	70,0	litieră	11.08. 2021 13:40	11.08. 2021 14:00
Renașterea Pădurii	XXIV Mehedinți II Burila	4%-15%, 7%, 8%	10 SC	6; 20	55,0	litieră	11.08. 2021 16:20	11.08. 2021 19:20
Renașterea Pădurii	I Gogoșu	101	Plantație SC	6; 10	8,0	litieră	13.08. 2021 14:00	13.08. 2021 15:00
Renașterea Pădurii	XXIV Mehedinți	6%, 8%	10 SC	6; 10	5,0	litieră	14.08. 2021 14:00	14.08. 2021 15:40

Notă: Sa - Suprafața afectată

În total au fost raportate **11 incendii de pădure** produse într-un interval de 10 zile din lunile august și septembrie 2021, care au afectat o suprafață totală de 611,85 ha. Incendiile au fost de suprafață, afectând litiera, vegetația erbacee, subarboretul, lemnul mort de la sol și preponderent, arborete și plantații de salcâm. Cauza raportată a incendiilor a fost propagarea din teren agricol pentru 10 dintre incendii și, respectiv, arderea miriștilor pentru 1 incendiu.

Pentru localizarea incendiilor și urmărirea evoluției acestora s-a utilizat imagini satelitare Sentinel 2 disponibile pe platforma Copernicus (<https://scihub.copernicus.eu/>), cât și două imagini înregistrate de sateliți din constelația PlanetScope Doves. Imaginile sateliților PlanetScope Dove sunt preluate în 4 benzi spectrale (3 benzi în spectrul vizibil și o bandă în spectrul infraroșu apropiat), ora de revizitare zilnică la nadir este 8:30 GMT (11:30 ora locală, oră de vară). Totodată au fost utilizate date satelitare privind locul incendiilor provenite de la senzorii MODIS și VIIRS, descărcate din platforma EFFIS.

Pentru atingerea obiectivului cercetărilor au fost descărcate 9 imagini satelitare Sentinel 2 (pentru zilele de 01.08.2021, 04.08.2021, 06.08.2021, 11.08.2021, 19.08.2021, 24.08.2021, 03.09.2021 și 08.09.2021), precum și datele vectoriale MODIS și VIIRS, reprezentând incendiile active de tip punct precum și extinderea suprafețelor incendiate de tip poligon derivate din imaginile MODIS, obținute de pe platforma EFFIS pentru toată luna august, în format *shapefile* în proiecție ETRS89.

4. REZULTATE

4.1 Cartarea distribuției tipurilor de combustibili pentru suprafețele acoperite cu vegetație din România

În vederea cartării, la nivel național, a tipurilor de combustibili vegetali, au fost combinate o serie de seturi de date geospațiale, utilizând-se pentru distribuția combustibililor forestieri Harta pădurilor pe unități ecosistemice (scara 1:100.000) (Doniță et al. 2008), pentru cea a combustibililor vegetali non-forestieri, baza de date Corine Land Cover 2018, iar pentru extragerea densității vegetației forestiere a fost utilizat produsul MOD44B derivat din imagini satelitare MODIS.

Clasificarea vegetației forestiere în raport cu natura stratului de litieră

Pentru cartarea pădurilor din România pe tipuri de combustibili în raport cu tipul de litieră s-a utilizat Harta pădurilor pe unități ecosistemice, în care pădurile sunt clasificate în 140 de tipuri de ecosisteme care la rândul lor sunt grupate în 12 grupe. Astfel, au fost identificate 5 tipuri de litieră relevante: *litieră de fag*, *litieră de rășinoase*, *litieră de cvercinee mezofite*, *litieră de cvercinee xerofite*, *litieră de alte specii de foioase*.

Prin echivalarea grupelor de păduri cu cele 5 tipuri de litieră considerate ca fiind relevante pentru separarea tipurilor de combustibili, s-a realizat Harta distribuției tipurilor de combustibili de suprafață (litieră) din România (Figura 4.1).

Clasificarea vegetației forestiere în raport cu densitatea acesteia (procentul de acoperire cu arbori)

Pentru a se descrie densitatea vegetației forestiere, valorile procentuale din stratul MOD44B reprezentând procentele de acoperire cu arbori au fost grupate în trei intervale de valori și au fost interpretate astfel: "arbori izolați" (procentul de acoperire al coroanelor acestora ocupă sub 10% din

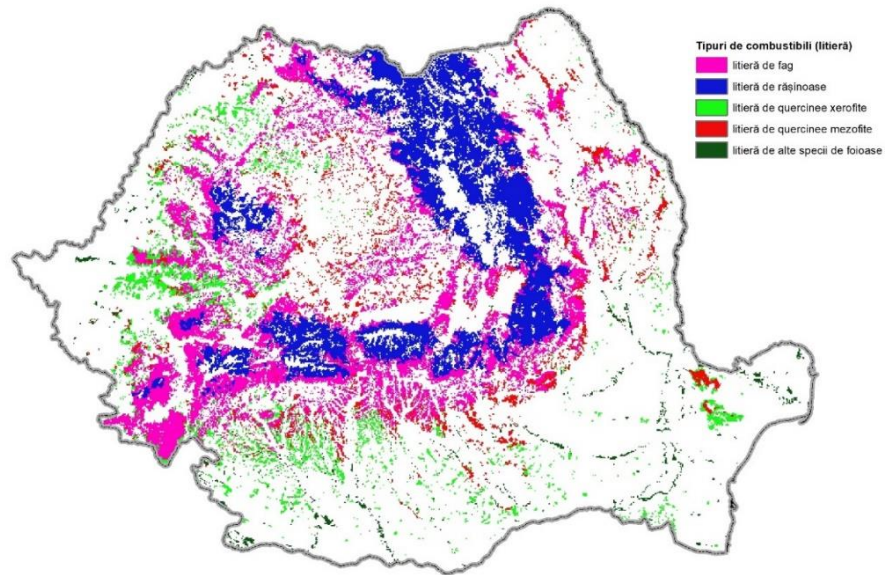


Figura 4.1. Harta tipurilor de combustibili de suprafață (litieră) pentru ecosistemele forestiere din România suprafață), „păduri deschise” (procentul de acoperire al coroanelor arborilor existenți ocupă între 10 și 40% din suprafață) și „păduri dense” (procentul de acoperire al coroanelor ocupă peste 40% din suprafață). Intervalele procentuale adoptate sunt cele utilizate și în sistemul de clasificare ArcFuel (Toukiloglou *et al.* 2008) și s-a obținut astfel Harta distribuției densității vegetației forestiere (Figura 4.2).

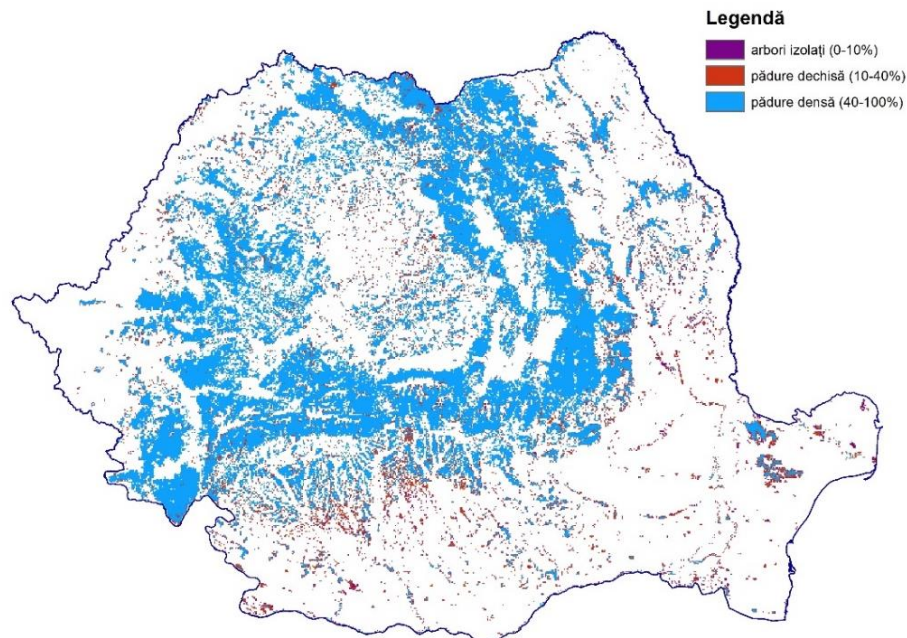


Figura 4.2. Harta distribuției densității vegetației forestiere la nivelul României obținută pe baza datelor MOD44B (stratul *percent tree cover*)

Grupa pajişti şi păşuni

Principalele clase de combustibil de vegetaţie din grupa pajiştilor au fost extrase din setul de date Corine Land Cover (CLC) 2018, iar în această grupă de combustibili au fost incluse următoarele tipuri de acoperire a terenului:

- *Păşuni şi pajişti permanente sub utilizare agricolă* (cod CLC-231), în care sunt cuprinse pajişti permanente caracterizate prin utilizarea agricolă sau puternic influenţate antropice şi a căror compoziţie floristică este dominată de graminee şi influenţată de activitatea umană. De obicei acestea sunt utilizate pentru păşunat (păşuni) sau pentru recoltarea de iarbă (pajişti/fâneţe)

- *Pajişti naturale* (cod CLC-321), în care sunt cuprinse terenuri de productivitate scăzută, acoperite cu iarbă, unde influenţa antropică lipseşte sau este de intensitate moderată. Adesea, acestea sunt situate în zone cu teren accidentat, denivelat, cu pante abrupte, frecvent incluzând zone stâncoase sau porţiuni acoperite de alt tip de vegetaţie (semi- naturală)

- *Terenuri predominant agricole în amestec cu vegetaţie naturală* (cod CLC-243), constituite din zonele ocupate în principal de agricultură, intercalate cu zone naturale sau semi-naturale semnificative (inclusiv păduri, arbuşti, zone umede, corpuri de apă, aflorimente minerale) într-un model spaţial mozaicat.

Grupa arbuşti

În această grupă a fost încadrată *vegetaţia subalpina arbustivă* (cod CLC-322) în care sunt cuprinse în cazul ţării noastre tufărişurile montane cu jneapăn, ienupăr, şi alte asociaţii vegetale arbustive scunde, pitice sau prostrate cu specii din genul *Rhododendron*, *Vaccinium* etc.

Grupa zone de tranziţie între arbuşti şi pădure

În această grupă au fost încadrate *zone de tranziţie cu arbuşti* (cod CLC-324) care cuprinde vegetaţie tranzitorie arbustivă şi erbacee, ocazional cu arbori dispersaţi. Acestea pot reprezenta zonele cu păduri degradate, în curs de recolonizare sau zone de succesiune naturală, zonele reprezentate de dezvoltarea naturală a formaţiunilor forestiere, formate din foioase sau răşinoase, cu vegetaţie erbacee şi arbori dispersaţi. Procesul de tranziţie poate fi de asemenea, reprezentat de succesiunea naturală pe terenurile agricole abandonate, regenerarea pădurilor în urma unor evenimente distructive (ex. furtuni, doborâturi produse de vânt, avalanşe, alunecări şi surpări de teren etc.), degradarea pădurii cauzată de factori de stres naturali sau antropici (ex. secetă, poluare), reîmpădurire după exploatare, etc.

Pe baza acestor considerente au identificate pentru teritoriul naţional grupele şi tipurile de combustibili de vegetaţie utilizate la elaborarea hărţii de distribuţie a acestora (Tabelul 4.1).

Tabelul 4.1. Tipurile de combustibili de vegetaţie selectate pentru realizarea hărţii distribuţiei tipurilor de combustibili la nivel naţional

Grupa de combustibili	Tipul de combustibili	Sursa datelor
Păduri	1. litieră fag/arbori izolaţi	Harta pădurilor pe unităţi ecosistemice MOD44B 2020
	2. litieră fag/pădure deschisă	
	3. litieră fag/pădure deasă	
	4. litieră răşinoase/arbori izolaţi	
	5. litieră răşinoase/pădure deschisă	
	6. litieră răşinoase/pădure deasă	
	7. litieră cvercinee xerofite/arbori izolaţi	
	8. litieră cvercinee xerofite/pădure deschisă	
	9. litieră cvercinee xerofite/pădure deasă	

Grupa de combustibili	Tipul de combustibili	Sursa datelor
	10.litieră cvercinee mezofite/arbori izolați	
	11.litieră cvercinee mezofite/pădure deschisă	
	12.litieră cvercinee mezofite/pădure deasă	
	13.litieră foioase/arbori izolați	
	14.litieră foioase/păduri deschise	
	15.litieră foioase/păduri dese	
Pajiști și pășuni	16.Pășuni și pajiști permanente sub utilizare agricolă	Corine Land Cover 2018
	17.Pajiști naturale	
	18.Terenuri predominant agricole în amestec cu vegetație naturală	
Arbuști	19.Vegetație subalpina arbustivă	Corine Land Cover 2018
Zone de tranziție între arbuști și pădure	20.Zone de tranziție cu arbuști	Corine Land Cover 2018

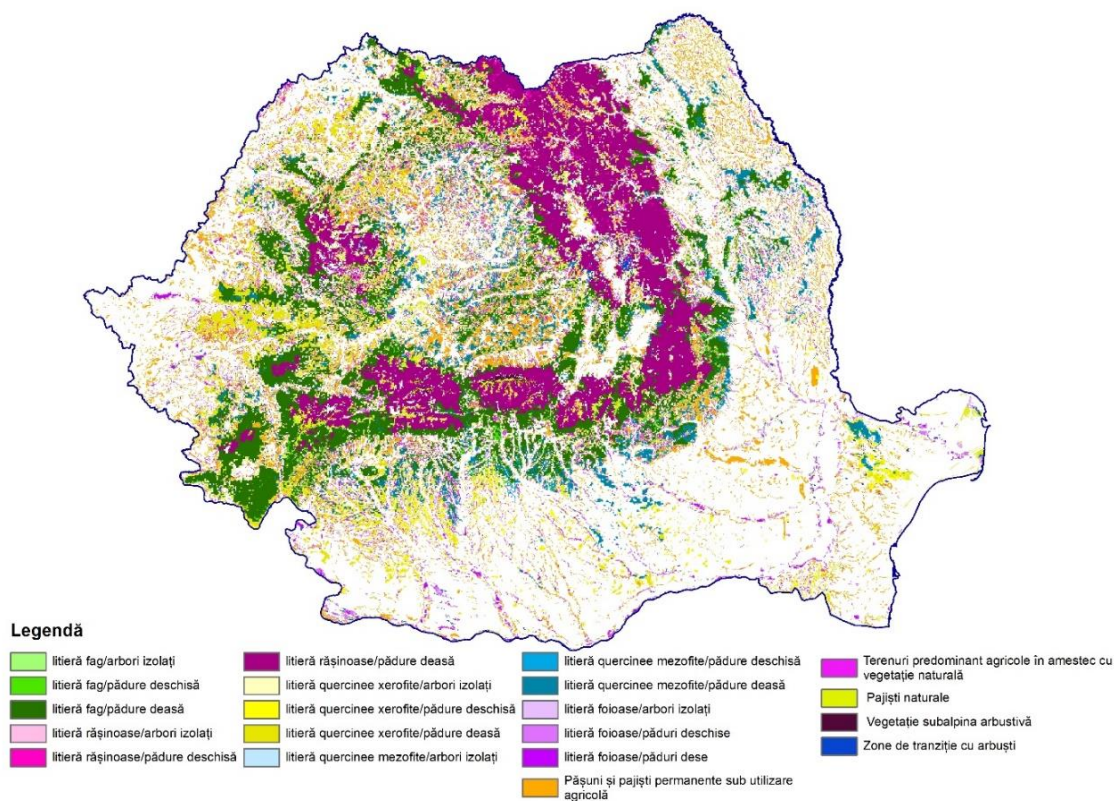


Figura 4.3. Harta distribuției tipurilor de combustibili vegetali la nivel național

În final, toate aceste straturi de vegetației reprezentând clase de combustibili au fost agregate într-un singur strat cu 20 de clase de tipuri de combustibili cu rezoluția de 30 m și a fost realizată harta tipurilor de combustibili la nivel național (Figura 4.3).

Pentru realizarea hărţii distribuţiei speciilor forestiere în funcţie de indicii de combustibilitate, au fost utilizaţi indicii de combustibilitate (IC) pentru principalele specii de arbori şi arbuşti din pădurile României (Adam, 2006), ținând cont de densitatea lemnului, viteza de ardere și puterea calorică. Datorită conținutului de rășini și densității mai mici a lemnului, rășinoasele au o combustibilitate mai mare decât foioasele.

Pentru echivalarea indicilor de combustibilitate la nivel de tip de ecosistem s-a utilizat și de această dată Harta pădurilor pe unități ecosistemice (Tabelul 4.2).

Tabelul 4.2. Indicii de combustibilitate la nivel de tip de ecosistem pentru pădurile din România

Tip ecosistem	IC	Tip ecosistem	IC
Amestec de cer cu fag	7	Frăsinete de luncă (în sud și cu frasin pufos)	2
Amestecuri de castan comestibil cu alte foioase	5	Frăsinete de luncă cu Fraxinus pallisae	2
Amestecuri de cer (gârniță) și gorun	7	Frăsineto-stejareto-plopișuri	2
Amestecuri de cer (gorun), cărpiniță și mojdrean	7	Gârnițete cu Carex praecox	7
Amestecuri de cer cu tei argintiu și carpen (șleauri)	7	Gârnițete cu cărpiniță și mojdrean	7
Amestecuri de cer, (gârniță) cu stejar pedunculat	7	Gârnițete cu Glechoma hirsuta	7
Amestecuri de cer, (gârniță, pedunculat), fag, tei argintiu	7	Gorunete acidofile	7
Amestecuri de cer, gârniță, fag	7	Gorunete cu Carex pilosa	7
Amestecuri de cer, gârniță, gorun, stejar pedunculat (carpen)	7	Gorunete cu carpen	7
Amestecuri de cer, gorun și fag	7	Gorunete cu cărpiniță și mojdrean	7
Amestecuri de cer, gorun, carpen	7	Gorunete cu cer și cărpiniță	7
Amestecuri de cer, gorun, stejar pedunculat	7	Gorunete cu corn	7
Amestecuri de fag și gorun acidofile	2	Gorunete cu mojdrean (frasin)	7
Amestecuri de fag și gorun cu tei argintiu, carpen (șleauri)	2	Gorunete cu Poa angustifolia-Carex praecox	7
Amestecuri de fag, brad, carpen	2	Gorunete cu tei argintiu (frasin)	7
Amestecuri de fag, castan comestibil	2	Gorunete neutrofile	7
Amestecuri de fag, gorun (carpen) neutrofile	2	Goruneto-stejărete de pedunculat cu carpen	7
Amestecuri de fag, gorun cu tei pucios și carpen (șleauri)	2	Goruneto-stejărete de pedunculat cu Poa angustifolia-Carex praecox	7
Amestecuri de fag, gorun, brad	2	Laricete de altitudine joasă	8
Amestecuri de fag, gorun, stejar pedunculat	2	Laricete și lariceto-molidișuri pe calcare	8
Amestecuri de fag, gorun, tei pucios	2	Molideto-brădete pe calcare	6
Amestecuri de fag, mojdrean (cărpiniță)	2	Molideto-făgete pe calcare	6
Amestecuri de gârniță cu stejar pedunculat	7	Molideto-făgeto-brădete acidofile	6
Amestecuri de gorun cu tei argintiu, carpen (șleauri)	7	Molideto-făgeto-brădete pe calcare	6
Amestecuri de gorun cu tei argintiu, cărpiniță (șleauri)	7	Molideto-făgeto-brădete slab acidofile	6
Amestecuri de gorun cu tei pucios și carpen	7	Molidișuri cu brad, acidofile	6
Amestecuri de gorun și cer cu tei argintiu, cărpiniță (șleauri)	7	Molidișuri cu brad, slab acidofile	6

Tip ecosistem	IC	Tip ecosistem	IC
Amestecuri de gorun si fag cu cărpiniță	7	Molidișuri cu fag acidofile	6
Amestecuri de molid, brad, gorun (carpen, fag)	6	Molidișuri cu fag slab acidofile	6
Amestecuri de pin silvestru cu foioase	8	Molidișuri cu Hylocomium ssp.	6
Amestecuri de stejar brumăriu (gorun) cu tei argintiu, carpen	7	Molidișuri cu Luzula sylvatica	6
Amestecuri de stejar brumăriu cu pufos	7	Molidișuri cu Oxalis acetosella	6
Amestecuri de stejar brumăriu cu tei argintiu, cărpiniță (șleauri)	7	Molidișuri cu Vaccinium myrtillus	6
Amestecuri de stejar brumăriu si cer (stejar pufos, gârniță)	7	Molidișuri pe calcare	6
Amestecuri de stejar brumăriu, stejar pufos, gorun, gârniță	7	Molidișuri și rariști cu Sphagnum ssp.	6
Amestecuri de stejar pedunculat cu tei argintiu, carpen (șleauri)	7	Pinete cu pin negru	8
Amestecuri de stejar pedunculat cu tei pucios, carpen (șleauri)	7	Pinete de pin silvestru cu Luzula-Rubus	8
Amestecuri de stejar pedunculat si gorun cu arțar tătarăsc	7	Pinete de pin silvestru cu Vaccinium myztilus	8
Aninișuri de anin alb	2	Pinete de pin silvestru pe stâncării acide	8
Aninișuri de anin negru	2	Plop euramerican	2
Aninișuri de baltă	2	Rariști de pin silvestru pe turbării cu Sphagnum sp.	8
Brădete acidofile	6	Salcâm cultivat	2
Brădete cu Pleurozium ssp.	6	Salcâm și plop euramerican cultivate	2
Brădete pe calcare	6	Salcâm și vișin turcesc cultivate	2
Brădete slab acidofile	6	Salcâm și vișin turcesc si ulm cultivate	2
Cătinișuri de cătină roșie	5	Salcâm, stejar brumăriu și frasin cultivate	2
Cembrete și cembreto-molidisuri cu Vaccinium myrtillus	8	Salcâm, stejar brumăriu, pin, ulm și vișin turcesc cultivate	2
Cerete cu Festuca heterophylla	7	Stejar brumăriu	7
Cerete cu Glechoma hirsuta	7	Stejar brumăriu cultivat	7
Cerete de silvostepa	7	Stejar brumăriu și frasin cultivate	7
Cereto-gârnițete cu Carex praecox	7	Stejărete de brumăriu cu arțar tătareșc	7
Cereto-gârnițete cu cărpiniță și mojdrean	7	Stejărete de brumăriu cu cărpiniță și mojdrean	7
Cereto-gârnițete cu Glechoma hirsuta	7	Stejărete de brumăriu, frăsinete si frasineto-plopișuri, aninișuri cu anin negru in Delta	7
Făgete acidofile cu pin silvestru	2	Stejărete de pedunculat cu arțar tătareșc	7
Făgete colinare acidofile	2	Stejărete de pedunculat cu Asarum europaeum	7
Făgete colinare amestecate	2	Stejărete de pedunculat cu carpen	7
Făgete colinare cu carpen	2	Stejărete de pedunculat cu Poa angustifolia-Carex praecox	7
Făgete colinare neutrofile	2	Stejărete de pedunculat cu Rubus caesius	7
Făgete cu alun turcesc	2	Stejărete de pedunculat cu tei argintiu	7
Făgete cu stejar și șleauri cu fag si stejar pedunculat	2	Stejărete de pedunculat pe nisipuri	7

Tip ecosistem	IC	Tip ecosistem	IC
Făgete cu tei pucios	2	Stejărete de pedunculat pe soluri mlăștinoase	7
Făgete cu Vaccinium myrtillus	2	Stejărete de pedunculat și brumăriu cu arțar tătäresc	7
Făgete de limita altitudinala superioara	2	Stejărete de pufos cu Carex humilis	7
Făgete montane acidofile	2	Stejărete de pufos cu cărpiniță și mojdrean	7
Făgete montane neutrofile balcanice	2	Stejărete de pufos cu scumpie	7
Făgete montane neutrofile dacice	2	Stejărete de stejar brumăriu pe nisipuri	7
Făgete pe calcare	2	Vișin turcesc și salcâm și ulm cultivate	2
Făgeto-brădetate acidofile	2	Zăvoaie complexe de plop și sălcii	2
Făgeto-brădetate pe calcare	2	Zăvoaie de plop cu Rubus caesius	2
Făgeto-brădetate slab acidofile	2	Zăvoaie de sălcii	2

În final a fost realizată harta digitală a distribuției indicelui de combustibilitate care a fost ulterior convertită din format vectorial în format raster cu rezoluția de 30X30 m (Figura 4.4). Formatul raster este formatul compatibil cu aplicațiile software utilizate pentru modelarea comportamentului incendiului.

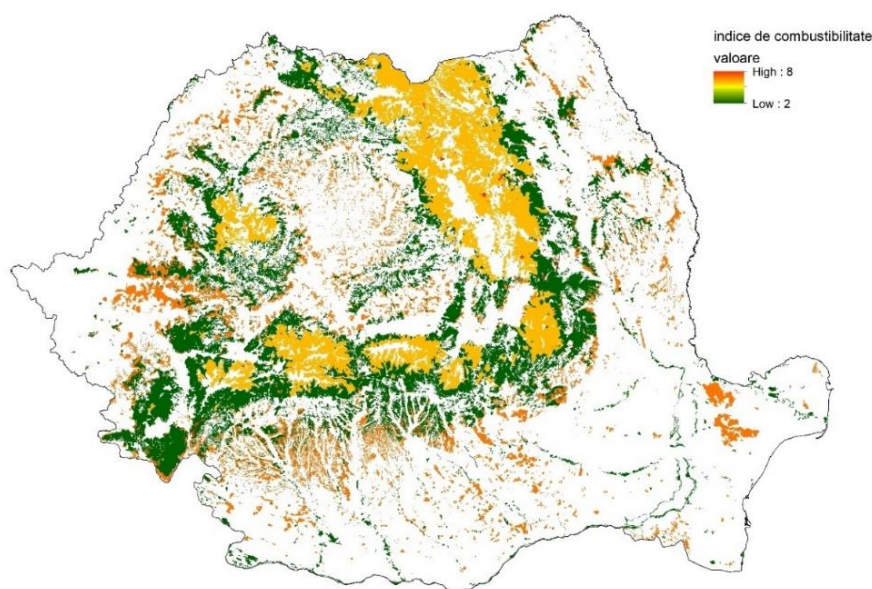


Figura 4.4. Harta indicilor de combustibilitate pentru ecosistemele forestiere din România

4.2 Zonarea hazardului și identificarea factorilor favorizanți pentru producerea incendiilor de pădure

4.2.1 Obținerea bazei de date geo-spațială și a hărții GIS a evenimentelor de incendiu produse în perioada anilor 2006-2023

În urma geo-localizării incendiilor pe baza hărților amenajistice georeferențiate, s-a obținut o bază de date, în sistemul de coordonate Stereografic 1970, în format GIS (*Geographic Information System*) privind incendiilor istorice de pădure. Pe baza localizării incendiilor și punerii în coordonate a acestora s-a realizat harta incendiilor de pădure înregistrate în perioada 2006-2023 (Figura 4.5).

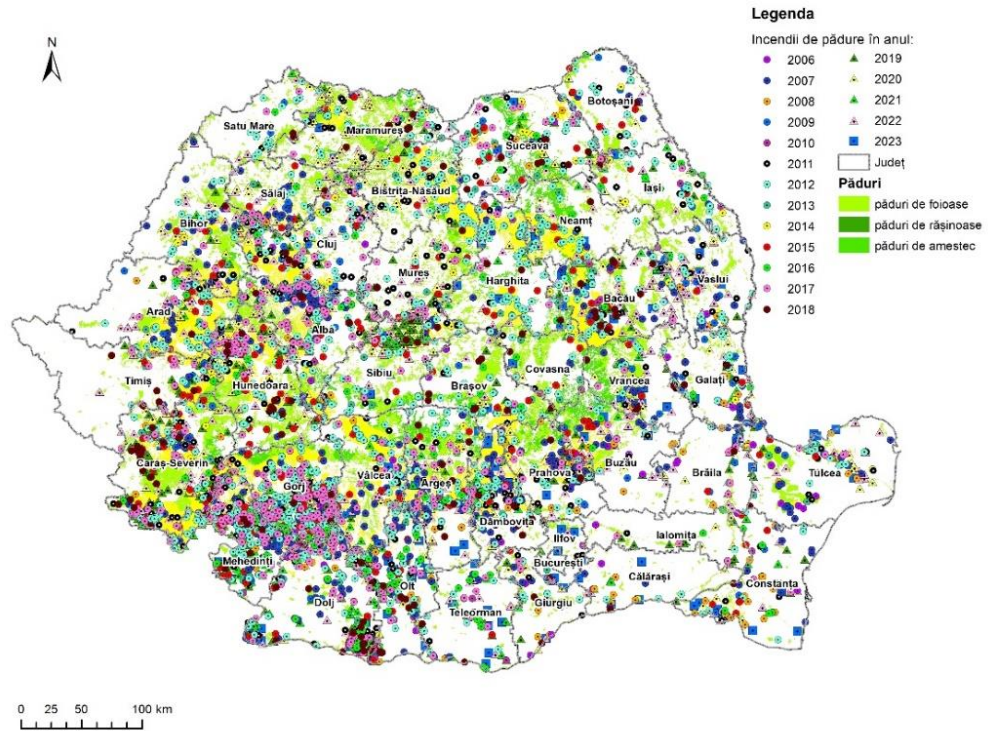


Figura 4.5. Harta incendiilor de pădure înregistrate în perioada anilor 2006-2023

Graficul evoluţiei anuale a incendiilor de pădure, ca număr şi ca suprafaţă afectată în perioada 2006-2023 este redat în figura 4.6 iar repartiţia lunară a incendiilor de pădure în Tabelul 4.3.

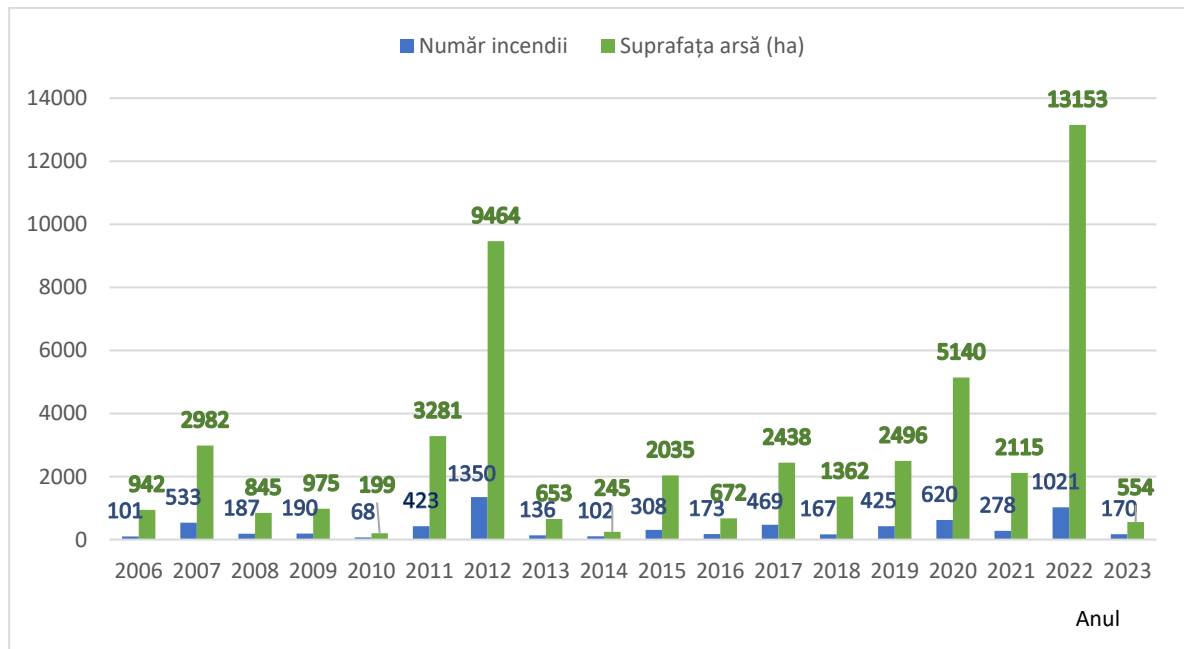


Figura 4.6. Distribuţia anuală a numărului de incendii de pădure (verde) şi a suprafeţelor afectate (albastru) în perioada anilor 2006-2018

Tabelul 4.3. Repartiția lunară a incendiilor de pădure în perioada 2006-2018

Luna	Frecvența		Suprafața	
	Nr.	(%)	(ha)	(%)
Ianuarie	90	2,2	255,0	1,0
Februarie	60	1,5	191,2	0,8
Martie	1329	32,8	8913,0	35,8
Aprilie	714	17,6	3777,5	15,2
Mai	102	2,5	352,4	1,4
Iunie	58	1,4	179,3	0,7
Iulie	453	11,2	2212,8	8,9
August	537	13,2	2327,5	9,4
Septembrie	331	8,2	2257,3	9,1
Octombrie	110	2,7	738,7	3,0
Noiembrie	198	4,9	2890,9	11,6
Decembrie	71	1,8	786,7	3,2
Total	4053	100,0	24882,6	100,0

Setul de date vectorial ce conține punctele de incendii a fost convertit într-o suprafață continuă a densității de aprindere, utilizându-se în acest sens modelarea *kernel* a densității de probabilitate (Lorenț et al. 2018). A fost adoptată astfel metoda de lucru cu *kernel fix*, cu scopul de a menține lățimea benzii (i.e. parametrul de netezire) constantă pe întreaga suprafață de studiu, iar pentru definirea dimensiunii lățimii de bandă s-a considerat ca fiind dublul distanței medii dintre punctele de aprindere a incendiilor. În figura 4.7 este prezentată densitatea de probabilitate *kernel* obținută.

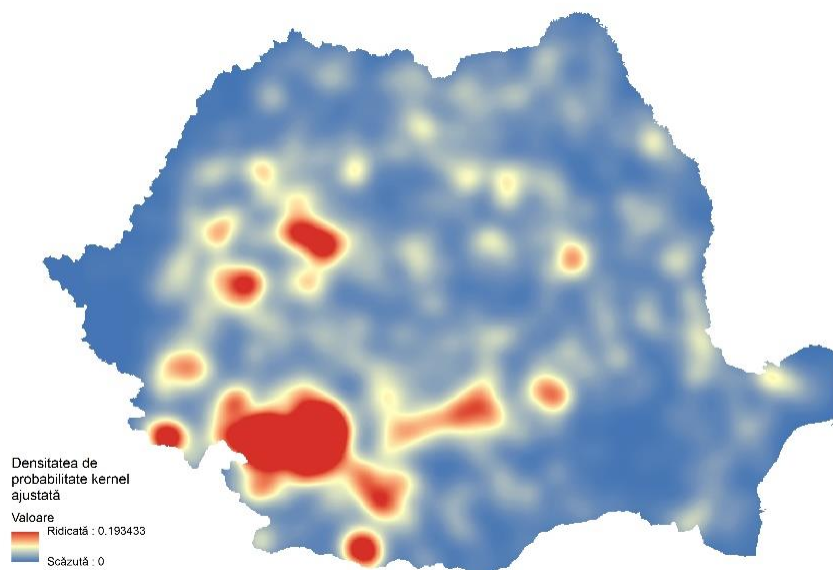


Figura 4.7. Intensitatea densității de probabilitate obținută prin modelul kernel pe baza punctelor de incendii de pădure localizate la nivel național

În final, cele 4220 de puncte de incendiu au fost intersectate cu rasterul reprezentând densitatea incendiilor, fiind astfel încorporat ca atribut distinct asociat punctelor, densitatea *kernel*, constituind variabila dependentă utilizată în modelările predictive.

4.2.2 Obținerea variabilelor independente pentru evaluarea hazardului la incendiile de pădure și identificarea factorilor favorizanți

Modelul consacrat care descrie elementele necesare inițierii unui incendiu este așa numitul *triunghi de foc* reprezentat de sursa de oxigen, sursa de căldură și materialul combustibil. Acești factori acționează în mod unitar pentru declanșarea unui incendiu. Prin urmare, pentru identificarea factorilor determinanți la incendii se urmărește reprezentarea acestora sub formă de seturi de date geospațiale.

În cadrul cercetărilor au fost generate un număr de 42 de variabile independente sub formă de rastere cu rezoluția spațială de 1 km² reprezentând elemente topografice, antropice, bioclimatice și caracteristici de vegetație. Acestea au fost alese luându-se în considerare cercetările în domeniu, efectuate atât pe plan internațional cât și național, în care au fost dezbătute factorii care influențează incendiile de pădure din România (Burlui 2013, Petrila et al. 2016).

În cadrul cercetărilor au fost abordate **19 variabile bioclimatice** care sunt derivate din valorile lunare de temperatură și precipitații și reprezintă tendințele anuale, sezonalitatea și valorile limită pentru anumite perioade. Descărcarea variabilelor climatice s-a realizat din cadrul geoportalului WORLDCLIM, acestea fiind descărcate sub forma a 19 fișiere arhivate, care conțin fișiere în format GeoTiff (.tif), câte unul pentru fiecare variabilă. Prin intermediul geoportalului GHS-POP al Centrului de Cercetare al Comisiei Europene (https://ghsl.jrc.ec.europa.eu/ghs_pop2019.php) au fost descărcate și date în format raster referitoare la distribuția și **densitatea populației** pe teritoriul României pentru anul 2015. Setul de date geospațiale a fost realizat la rezoluții spațiale de 250 m și respectiv, 1 km.

Pentru generarea **variabilelor topografice** s-a utilizat modelul digital al terenului realizat prin tehnica interferometriei radar satelitar obținute de NASA prin misiunea *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). O versiune îmbunătățită a acestui produs, versiunea 3, realizată pe baza observațiilor din banda C a radarului, prezintă o rezoluție spațială de aproximativ 30 m și utilizează, pentru a completa datele lipsă din versiunile anterioare ale SRTM, date topografice din alte surse geospațiale.

Prin aplicarea unor instrumente specifice de prelucrare a modelului digital al terenului SRTM au fost obținute variabile topografice (expoziția și înclinarea terenului), precum și alți indici topografici (indicele topografic de poziție - TPI, indicele topografic de umiditate - TWI, indicele topografic de cuantificare a radiației solare - TRASP).

Expoziția terenului este o variabilă circulară, care nu poate fi utilizată în statistici liniare. Astfel, aceasta a fost transformată în Indicele topografic de cuantificare a radiației solare, care ia valori cuprinse între 0 și 1, valorile mari ale indicelui reprezentând zone cu expuneri însorite, respectiv valori scăzute ale indicelui reprezentând zone cu expuneri umbrite. Indicele a fost calculat prin utilizarea formulei (4.1) iar distribuția spațială, pe teritoriul României se prezintă în figura 4.8.

$$TRASP = \frac{1 - \cos\left(\left(\frac{\pi}{180}\right) * (\alpha - 30)\right)}{2}, \quad (4.1)$$

Unde α reprezintă expoziția terenului (grade hexazecimale)

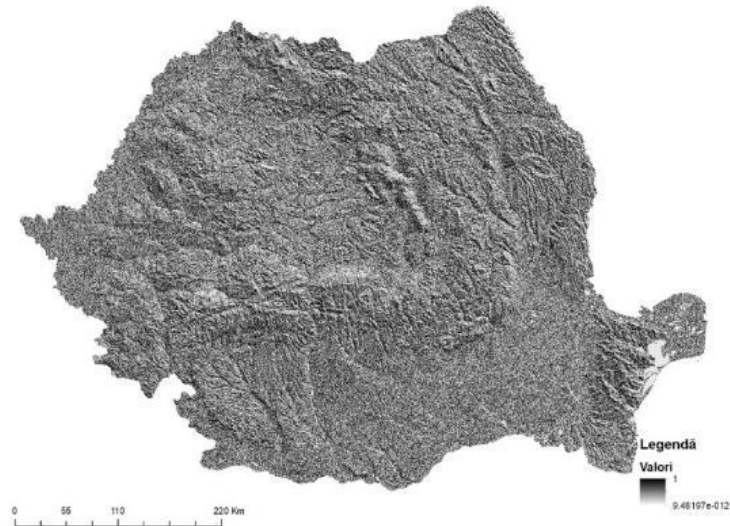


Figura 4.8. Distribuția indicelui topografic de cuantificare a radiației solare – TRASP, pentru teritoriul României.

Totodată, prin aplicarea unor instrumente specifice de prelucrare a modelului SRTM s-au obținut și indicii topografic de poziție – TPI, respectiv indicii topografic de umiditate – TWI.

Indicii de vegetație NDVI și EVI au fost descărcați sub formă de rastere de 1km² din platforma EarthData (<https://search.earthdata.nasa.gov>), iar pentru analiză au fost introduse date vectoriale privind rețeaua națională de drumuri (drumuri naționale, județene și respectiv alte tipuri de drumuri), rețeaua națională de căi ferate, limitele localităților, precum și date vectoriale obținute pe baza de prelucrări ale hărților de acoperire/utilizare a terenului Corine Land Cover (CLC) 2018 (Figura 4.9). Acest set de date este unul dintre cele mai cunoscute și utilizate produse furnizate de Serviciul de Monitorizare a Terenurilor Copernicus.

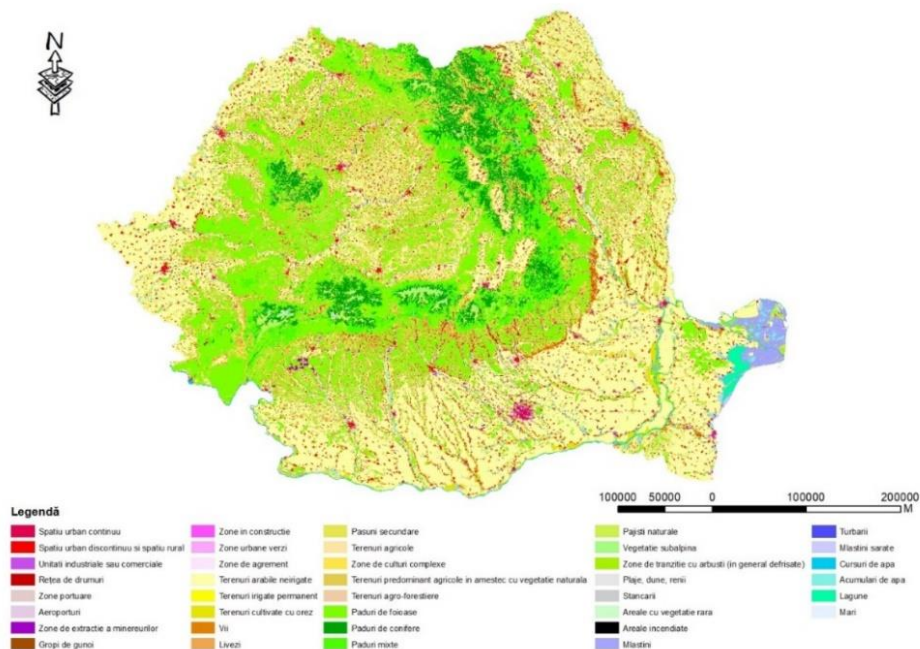


Figura 4.9. Distribuția acoperirii/utilizării terenului pentru România (Corine Land Cover 2018)

Prin utilizarea analizei spațiale (calculul distanței euclidiene) și cu ajutorul aplicației informatice *ArcMap* (instrumentul *Euclidean distance*) au fost realizate hărți digitale referitoare la aceste distanțe pentru straturile vectoriale care conțin rețelele națională de drumuri, de căi ferate și respectiv, a localităților. Analizele geospațiale au fost prezentate sub formă de fișier raster cu rezoluția 1km.

De asemenea, au fost calculate și distanțele euclidiene față de limitele următoarelor clase de acoperire/utilizare a terenului din cadrul clasificării CLC 2018 – *pășuni secundare, terenuri predominant agricole în amestec cu vegetație naturală, zone de tranziție cu arbuști, păduri*. Clasa păduri analizată cuprinde atât limitele evidențiate în clasificarea CLC2018 cât și pe cele din *Harta pădurilor pe unități ecosistemice* din cadrul INCDS (Doniță et al., 2008).

Pentru fiecare dintre clasele de acoperire/utilizare a terenurilor - *pășuni secundare, terenuri predominant agricole în amestec cu vegetație naturală, zone de tranziție cu arbuști și păduri* au fost calculate și ponderea acestora (%), pe unitate de suprafață (1km²), rezultatele fiind prezentate, de asemenea, sub formă de fișier raster precum și tabelar pentru toate cele 42 de variabile independente generate la rezoluția spațială de 1km² (tabelul 4.4).

Tabelul 4.4. Centralizator cu variabilele predictive utilizate în cadrul analizelor statistice

N r c r t	Denumirea variabilei	Unitatea de măsură/semnificația variabilei	Sursa straturilor vectoriale/datelor inițiale
1	Distanța euclidiană pentru stratul vectorial drumuri naționale, județene, autostrăzi	km	ESRI România
2	Distanța euclidiană pentru stratul vectorial <i>alte drumuri</i>	km	ESRI România
3	Distanța euclidiană pentru stratul vectorial <i>căi ferate</i>	km	ESRI România
4	Distanța euclidiană pentru stratul vectorial <i>localități</i>	km	ESRI România
5	Distanța euclidiană pentru clasa CLC2018- <i>pășuni secundare (CLC231)</i>	km	Corine Land Cover 2018
6	Distanța euclidiană pentru clasa CLC2018- <i>terenuri predominant agricole în amestec cu vegetație naturală (CLC 243)</i>	km	Corine Land Cover 2018
7	Distanța euclidiană pentru clasa CLC2018- <i>zone de tranziție cu arbuști (CLC 324)</i>	km	Corine Land Cover 2018
8	Distanța euclidiană pentru clasa <i>păduri (CLC 31)</i>	km	Corine Land Cover 2018 și Harta pădurilor pe unități ecosistemice
9	Procentele pe unitate de suprafață ale clasei CLC2018- <i>terenuri predominant agricole în amestec cu vegetație naturală (CLC 243)</i>	Procent * km ⁻²	Corine Land Cover 2018
10	Procentele pe unitate de suprafață ale clasei CLC2018- <i>zone de tranziție cu arbuști (CLC 324)</i>	Procent * km ⁻²	Corine Land Cover 2018

Nr cr t	Denumirea variabilei	Unitatea de măsură/semnificația variabilei	Sursa straturilor vectoriale/datelor inițiale
11	Procentele pe unitate de suprafață ale clasei CLC2018- <i>pășuni secundare (CLC231)</i>	Procent * km ⁻²	Corine Land Cover 2018
12	Procentele pe unitate de suprafață ale clasei CLC2018- <i>păduri (CLC 31)</i>	Procent * km ⁻²	Corine Land Cover 2018 și Harta pădurilor pe unități ecosistemice
13	Procentul de acoperire cu vegetație	Procent * 0,5km ⁻²	MODIS(MOD44B)
14	Indicile diferențial normalizat al vegetației	adimensional	MODIS(MOD13A3)
15	Tipul (materialul) combustibil	Stratul de litieră de fag (F.T.1) / de rășinoase (F.T.2) / stejar xerofit (F.T.3) / stejar mezofit (F.T.4) / alte păduri de foioase (F.T.5)	Corine Land Cover 2018 și Harta pădurilor pe unități ecosistemice
16	Efective de caprine	număr*localitate ⁻¹	Autoritatea Națională Sanitară Veterinară și pentru Siguranța Alimentelor
17	Densitatea medie a populației	Număr* km ⁻²	https://ghsl.jrc.ec.europa.eu/ghs_p2019.php
18	Înclinarea terenului	Grade	modelul digital al terenului SRTM
19	Altitudinea	m	modelul digital al terenului SRTM
20	Indicele topografic de cuantificare a radiației solare	$\frac{I - \cos\left(\left(\frac{\pi}{180}\right) * (\alpha - 30)\right)}{2}$ α - expoziția în grade	modelul digital al terenului SRTM
21	Indicele topografic de poziție (TPI)	m	modelul digital al terenului SRTM
23	Indicele topografic de umiditate (TWI)	adimensional	modelul digital al terenului SRTM
24	Date bioclimatice	19 variabile bioclimatice: temperatura medie anuală; Intervalul mediu diurn; Izotermitatea; temperatura sezonieră; temperatura maximă a celui mai calde luni; temperatură minimă din cea mai rece lună; intervalul anual de temperatură; temperatura medie a celui mai ploios trimestru; temperatura medie a celui mai secetos trimestru; temperatura medie a celui mai cald trimestru; temperatura medie a celui mai rece trimestru; precipitațiile anuale; precipitațiile celei mai ploioase luni; precipitațiile	Baza de date WorldClim (www.worldclim.org)

N r c r t	Denumirea variabilei	Unitatea de măsură/semnificația variabilei	Sursa straturilor vectoriale/datelor inițiale
		cele mai uscate luni; precipitațiile sezoniere; precipitațiile celui mai ploios trimestru; precipitațiile celui mai uscat trimestru; precipitațiile celui mai cald trimestru și precipitațiile celui mai rece trimestru.	

4.2.3 Identificarea factorilor favorizanți la incendiile de pădure și zonarea hazardului prin rularea modelelor explicative

4.2.3.1 Generarea hărții de hazard și identificarea factorilor favorizanți la incendiile de pădure cu ajutorul modelului Random Forest

Numărul de arbori necesar a fi generat de model a fost setat la 500, deoarece erorile tind să se stabilizeze înainte ca acest număr de arbori de clasificare să fie atins (Lawrence et al., 2006). Parametrul *mtry*, respectiv numărul de variabile luate în considerare la fiecare diviziune a nodului, a fost ales ca rădăcina pătrată a numărului variabilelor de intrare în algoritm (Gislason et al., 2006).

Pentru rularea modelului s-a utilizat *programul R*. Variabila dependentă luată în considerare a fost densitatea *Kernel* a incendiilor rezultată din prelucrarea datelor geospațiale cu înregistrările incendiilor din perioada 2006-2018. Pentru calculul hazardului au fost luate în considerare variabilele independente din Tabelul 4.5, și a fost testată influența lor asupra hazardului, fiind luate în considerare cele evidențiate de model că au un impact semnificativ (Figura 4.10). Astfel au fost considerate unele variabile bio-climatice, altele privitoare la relief, configurația terenului, expoziție, date privitoare la distanțele pădurii față de drumuri și localități, date cu privire la vegetație, anumite straturi din *Corine Land Cover*, date statistice privitoare la efectivele de animale și populație.

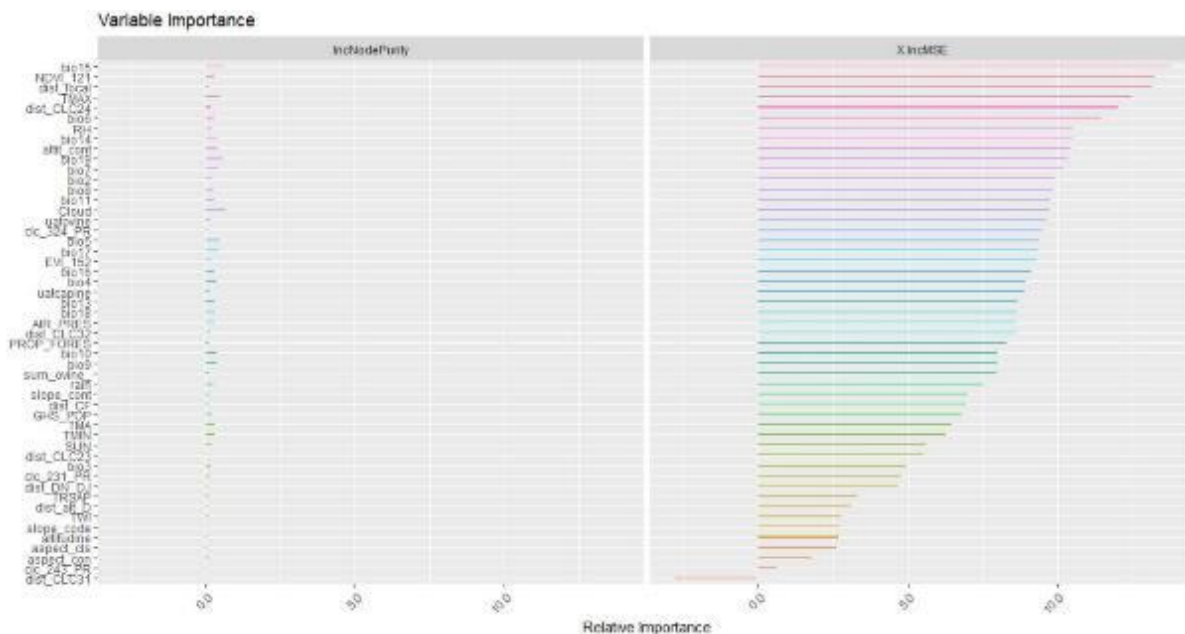


Figura 4.10. Ierarhizarea variabilelor predictive, după importanță în modelul Random Forest

După mai multe iterații au fost selectate în final un număr de 9 variabile, ca având impact semnificativ, harta rezultată fiind apoi ajustată pentru zona acoperită cu păduri. Acestea se prezintă, după cum urmează:

1. Precipitațiile sezoniere (coeficient de variație)
2. NDVI - Indicele diferențial normalizat al vegetației
3. Distanța față de localități
4. Temperatura maximă a celui mai calde luni
5. CLC 243 - proporția terenurilor agricole (din Corine Land Cover)
6. Altitudinea
7. Precipitațiile în luna cea mai secetoasă
8. CLC 324 - Tranziția între păduri-tufărișuri (din Corine Land Cover)
9. Efectivele de ovine

Capacitatea predictivă a modelului, respectiv varianța explicată de acesta a fost estimată la valoarea 63,46% (Figura 4.11), rezultând astfel harta care descrie nivelul de hazard pentru zona cu păduri (Figura 4.12).

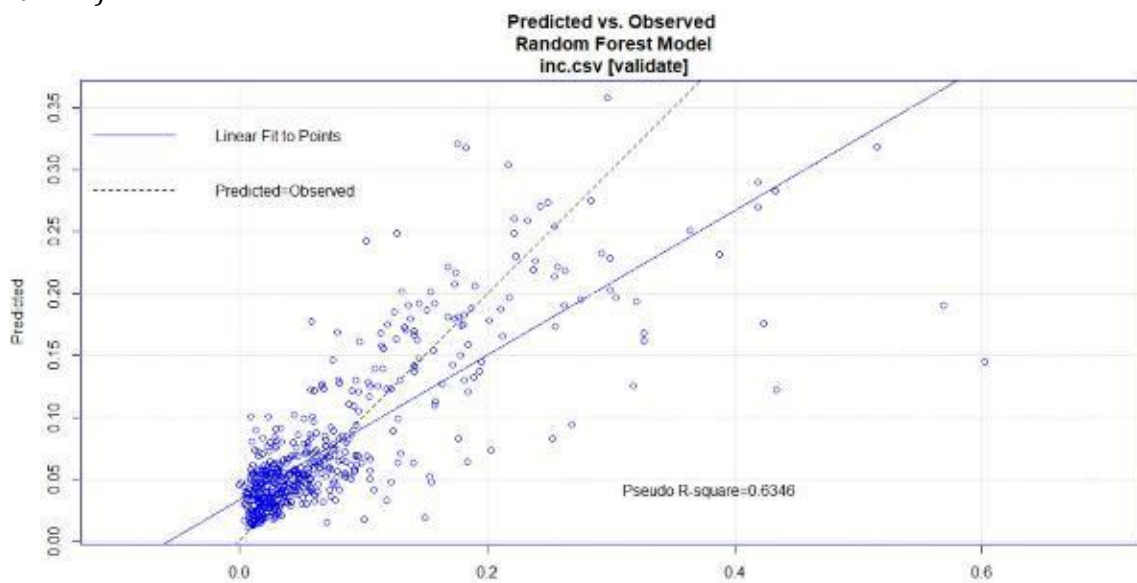


Figura 4.11. Diagrama variabile prezise vs. variabile observate în modelul Random Forest

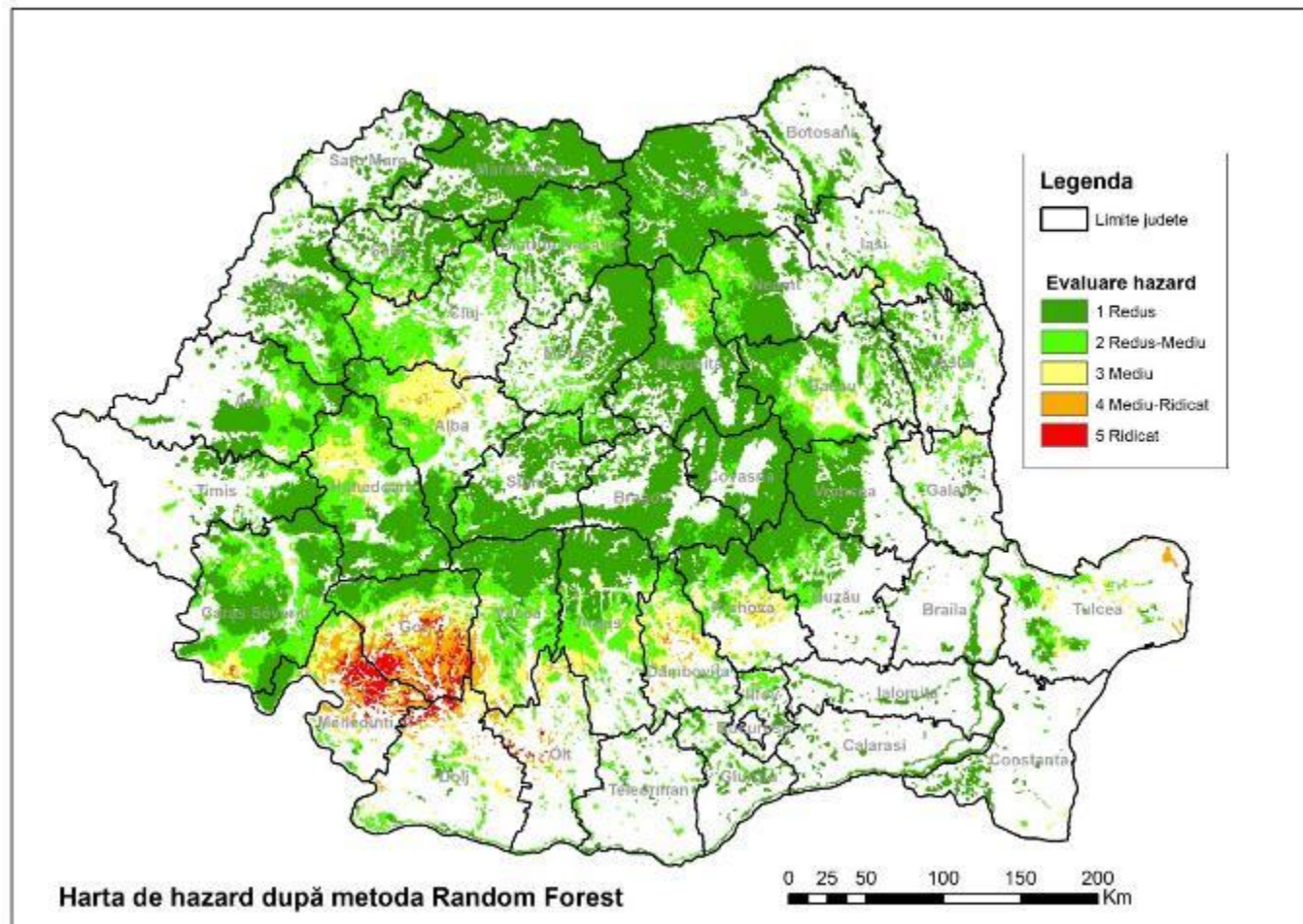


Figura 4.12. Harta de hazard la incendii de pădure obținută pe baza modelului Random Forest

Validarea modelului

Pentru verificarea acurateţii hărţii s-au utilizat incendiile detectate de senzorul VIIRS aflat la bordul sateliţilor meteorologici *NASA Suomi National Polar-orbiting Partnership*. Senzorul VIIRS detectează incendiile active, în timp aproape real (similar senzorului *MODIS*) şi oferă o rezoluţie spaţială de 375 m. Baza de date privind incendiile de vegetaţie a fost descărcată în format *shapefile* pentru perioada 2006-2018 de pe platforma *FIRMS* administrată de *NASA* şi s-a realizat intersecţia cu zonarea hazardului la incendiu rezultată din *Random Forest*, obţinându-se ponderea intersecţiei incendiilor VIIRS cu zonele de hazard (Figura 4.13).

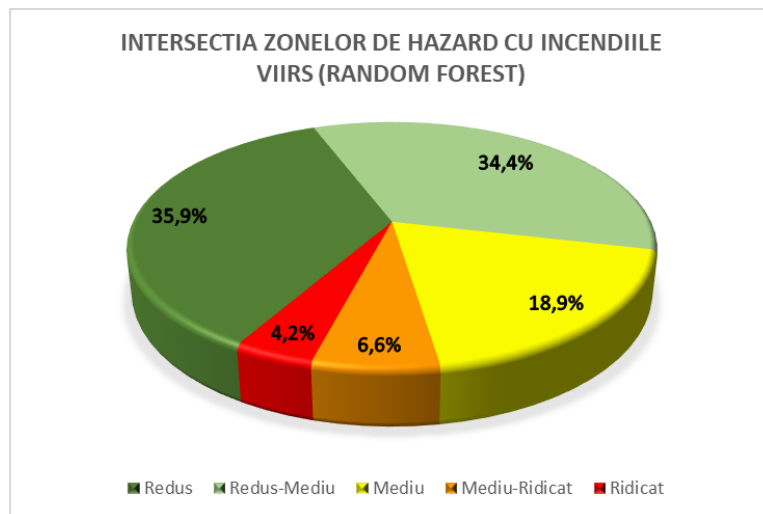


Figura 4.13. Ponderea incendiilor detectate de senzorul VIIRS pe clasele de hazard delimitate prin modelul *Random Forest*

Se remarcă faptul că ponderea incendiilor VIIRS pe clase de hazard este proporțională cu suprafața ocupată de fiecare clasă, ceea ce indică o performanță predictivă bună a modelului *Random Forest*.

4.2.3.2 Generarea hărții de hazard și identificarea factorilor favorizanți la incendii de pădure cu ajutorul regresiei logistice

În cazul regresiei logistice variabila dependentă a fost considerată pe de o parte, baza de date cu cele 4220 de puncte de incendiu din perioada 2006-2018 (valoarea dihotomică 1), iar pe de altă parte un număr egal de puncte non-igniție (valoarea dihotomică 0). Aceste puncte non-igniție au fost generate astfel: s-a realizat o zonă tampon (*buffer*) de 3 km în jurul punctelor de incendiu reale iar cu ajutorul acestuia a fost decupată zona acoperită cu pădure la nivel național (din *Corine Land Cover*) și apoi a fost generat un număr de 4220 de puncte aleatorii în zona de pădure astfel rămasă. Aceste puncte reprezintă mai degrabă puncte de pseudo-nonigniție, întrucât și aceste suprafețe sunt susceptibile la incendii, însă presupunem că probabilitatea de declanșare a unui incendiu este semnificativ mai redusă într-o zonă care a fost ferită de acest fenomen pe perioada analizată (2006-2018). Cele 8440 de puncte au fost intersectate cu toate rasterele ce reprezintă variabilele independente iar datele au fost introduse în programul statistic *SPSS* pentru rularea modelului. S-a verificat coliniaritatea variabilelor și au fost eliminate ajutorul testului *Spearman*, variabilele cu probleme de coliniaritate respectiv, cele cu o

corelație mai mare de 0.8 după care variabilele rămase au fost introduse în modelul logistic. Au fost astfel eliminate 14 variabile din cele 42 de variabile predictive.

A fost aplicată metoda *Forward-Wald* pentru a construi modelul de regresie logistică multiplă care începe cu modelul fără nicio variabilă (doar cu constanta) și apoi, prin aplicarea unui proces iterativ, sunt selectate și introduse în model variabile noi pe baza scorului semnificației statistice, eliminarea variabilelor realizându-se prin intermediul testului de probabilitate *Wald*, până la atingerea unui nivel optim în care nicio variabilă omisă nu ar putea contribui semnificativ la performanța modelului. Semnificația generală a fost evaluată luând în considerare testul Hosmer și Lemeshow, pentru valori ale lui $p > 0,05$ modelul poate fi luat în considerare. Astfel, a fost generate un număr de 32 de modele dintre care a fost ales modelul cu cel mai ridicat coeficient de determinație R^2 (0.372 în cazul nostru) și $p > 0,05$ (testul *Hosmer* și *Lemeshow*). În Tabelul 4.5 sunt prezentate variabilele luate în considerare în modelul regresiei logistice.

Tabelul 4.5. Variabilele luate în considerare în modelul regresiei logistice

Variabila	B.	S.E	Wald	df	Sig.	Exp(B)	95% C.I.for EXP(B)	
							Lower	Upper
altitudine	.001	.000	11.018	1	.001	1.001	1.000	1.001
precipitațiile celei mai secetoase luni	-.012	.001	108.157	1	.000	.988	.985	.990
precipitațiile celui mai secetos trimestru	.002	.001	9.275	1	.002	1.002	1.001	1.003
precipitațiile celui mai rece trimestru	.002	.001	11.359	1	.001	1.002	1.001	1.003
temperatura medie a celui mai cald trimestru	1.092	.131	69.933	1	.000	2.981	2.308	3.851
proporție pășuni secundare	.007	.002	13.295	1	.000	1.007	1.003	1.011
proporție terenuri agricole	.007	.003	3.923	1	.048	1.007	1.000	1.014
proporție zone arbuști	.032	.004	75.320	1	.000	1.032	1.025	1.040
distanța căi ferate	.000	.000	14.347	1	.000	1.000	1.000	1.000
distanța față de păduri	.000	.000	13.294	1	.000	1.000	1.000	1.000
distanța DN/DJ	.000	.000	12.659	1	.000	1.000	1.000	1.000
distanța localități	.000	.000	69.754	1	.000	1.000	1.000	1.000
densitatea populației	.002	.000	31.840	1	.000	1.002	1.001	1.003
NDVI	-.001	.000	244.285	1	.000	.999	.999	.999
panta	.015	.003	18.956	1	.000	1.015	1.008	1.022

Variabila	B.	S.E	Wald	df	Sig.	Exp(B)	95% C.I.for EXP(B)	
							Lower	Upper
efective ovine caprine	.000	.000	36.984	1	.000	1.000	1.000	1.000
TRSAP	.279	.075	13.949	1	.000	1.322	1.142	1.530
constanta	2.911	.540	29.063	1	.000	18.384		

Harta privind distribuția hazardului la incendii a fost generată preluând coeficienții de regresie rezultați din modelarea **SPSS** și generarea rasterului în programul **ArcGIS** cu ajutorul funcției *Raster Calculator* (Figura 4.14). Clasele au fost generate prin metoda *Natural Breaks*.

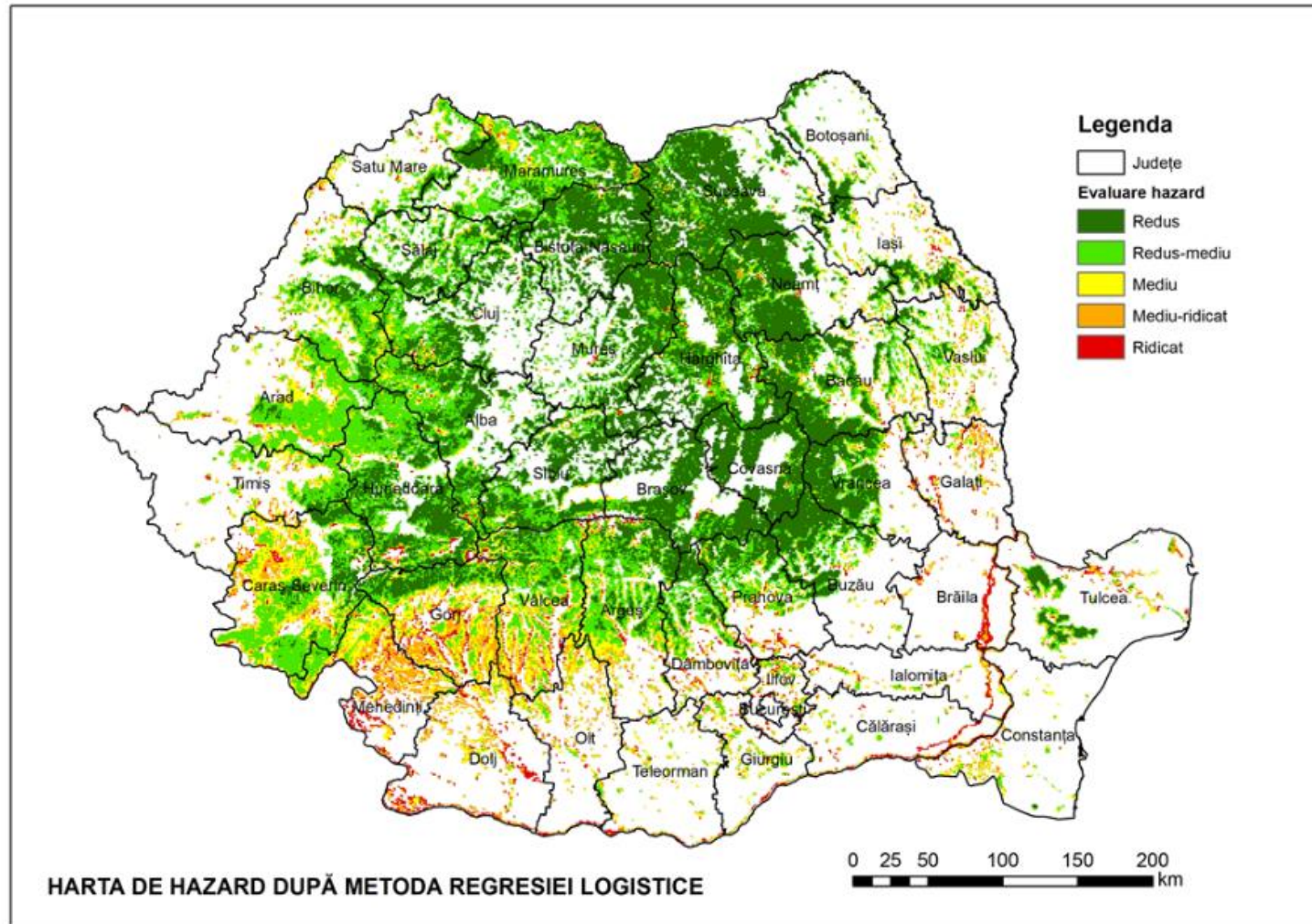


Figura 4.14. Harta privind hazardul la incendii de pădure după metoda regresiei logistice

Validarea modelului

Validarea modelului a fost realizată, de asemenea, prin intersectarea zonelor de hazard cu incendiile satelitare detectate de senzorul VIIRS (Figura 4.15).

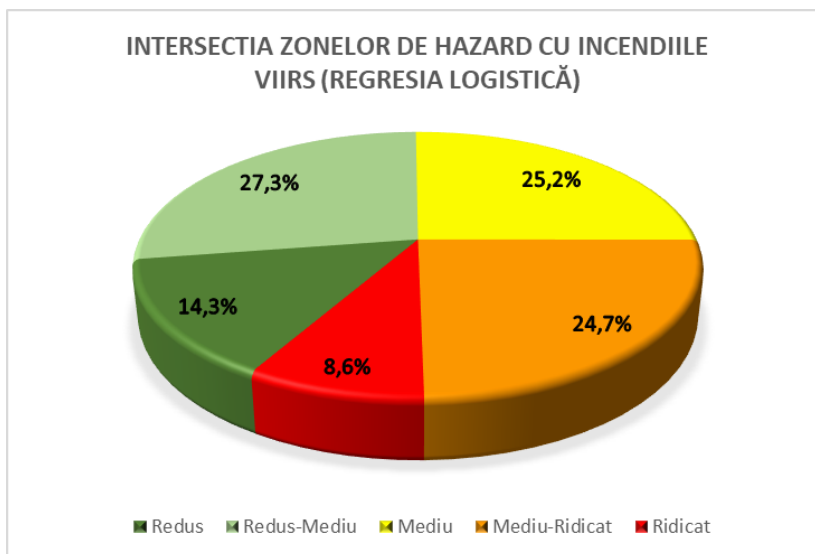


Figura 4.15. Ponderea incendiilor detectate de senzorul VIIRS pe clasele de hazard delimitate prin metoda regresiei logistice

Analiza zonării hazardului și a factorilor favorizanți obținute prin cele două modele explicative

În cazul modelului **Random Forest**, un set de factori de influență cu impact asupra hazardului la incendii forestiere sunt reprezentați de vegetația forestieră (prezență/absență) alături de starea de vegetație (NDVI), deci de cei legați de prezența combustibililor. Suprafețele reduse acoperite cu pădure din zonele de câmpie și relativa lor izolare/fragmentare implică un nivel mai redus al hazardului, comparativ cu zonele de munte unde pădurile ocupă suprafețe extinse și compacte.

Se observă totodată că datele climatice, care au un impact mai important sunt legate de temperatura maximă și precipitațiile sezoniere din luna cea mai secetoasă, deci cele care influențează direct condițiile de declanșare și propagare a incendiilor de vegetație, adică umiditatea combustibililor. Aceasta face ca, din punct de vedere statistic, pădurile situate în zona montană, cu un climat mai umed, să prezinte un nivel de hazard mai redus la incendii. Altitudinea are o influență combinată, determinată de temperaturi/precipitații dar și de prezența umană.

Este evident că prezența și acțiunea omului sunt determinante, având cea mai mare pondere ca factor declanșator, prin distanța față de localități, proporția de terenuri agricole și zona de tranziție dintre păduri și tufărișuri și efectivele de ovine. Acest aspect este vizibil în special în zona subcarpatică, unde pădurile, terenurile agricole și localitățile sunt cel mai mult intercalate. Practic aceasta constituie zona cu cel mai mare risc de incendii în condiții obișnuite, fiind îndeplinite toate criteriile necesare declanșării și propagării incendiilor, respectiv secetă, suprafețe extinse de păduri mozaicate cu localități și terenuri

agricole. Totodată, ipoteza potrivit căreia principalele cauze de apariție a incendiilor forestiere sunt preponderent de ordin antropoc este susținută de numeroase studii.

Harta de hazard obținută este confirmată și de studiile anterioare efectuate la nivelul României, bazate pe aplicarea metodei *kernel* de estimare a densității de probabilitate, unde cercetările au evidențiat existența unor zone cu nivel ridicat de hazard la incendii forestiere în județele Gorj, Mehedinți, Alba, Caraș-Severin, Dolj și Vâlcea (Lorenț et al., 2018).

În ceea ce privește repartitia spațială a zonelor de hazard obținută prin intermediul **regresiei logistice**, putem afirma faptul că modelul adoptat a surprins cu un grad ridicat de încredere situația reală, întrucât zonele de hazard mediu-ridicat și ridicat sunt în zonele de fragmentare a pădurii, colinare sau de câmpie, în care aceasta este puternic fragmentată de terenuri agricole sau pășuni, în care practicile de ardere a resturilor vegetale sunt frecvente, densitatea populației este ridicată iar climatul este unul mai secetos. În masivele forestiere montane pericolul de incendiu este cu precădere redus, aspect confirmat de adevărul potrivit căruia aici se produc incendii mai rar, mai mult în timpul verii, când acestea apar ca urmare a neglijenței turiștilor sau a lucrătorilor forestieri. Pădurea din culoarul Dunării a fost încadrată în clasa de pericol maxim ceea ce este mai degrabă discutabil, dat fiind faptul că această zonă nu prezintă incendii de pădure frecvente, explicația fiind aceea că modelul a acordat importanța cea mai ridicată factorilor climatici indicatori de uscăciune și proximității localităților.

În ceea ce privește factorii care influențează apariția incendiilor de pădure, modelul a selectat variabile topografice (altitudinea, panta, TRASP - indicele topografic de cuantificare a radiației solare), variabile climatice (precipitațiile celei mai secetoase luni, temperatura medie a celui mai cald trimestru, precipitațiile celui mai rece trimestru, precipitațiile celui mai secetos trimestru), variabile antropice (efective ovine caprine, densitatea populației, distanța DN/DJ, distanța căi ferate, proporția terenurilor agricole, proporția pășunilor secundare) sau calculate în funcție de tipul de acoperirea cu vegetație forestieră sau tufărișuri (NDVI, distanța față de păduri, proporție zone arbuști).

Expoziția terenului (cuantificată prin indicele TRASP) influențează pericolul de incendiu prin mai multe căi: o expoziție însorită determină un grad de uscăciune mai mare, umiditate mai scăzută, temperaturi mai ridicate ale microclimatului, perioada cu lumină naturală din zi mai mare etc.; o expoziție umbră determină o umiditate mai mare, temperaturi mai reduse ale microclimatului, perioadă cu lumină naturală din zi mai mică etc.

Distanța dintre pădure, zonele antropice și rețelele de drumuri, influențează în mod direct riscul de incendiu, prin cauzele care determină declanșarea acestuia care sunt în marea lor majoritate pornite de factorul uman (propagarea focului din terenurile agricole ca urmare a arderilor de curățare a pășunilor și miriștilor, neglijență, accidente).

Precipitațiile scăzute din perioada de iarnă determină ca gradul de uscăciune al combustibililor să fie ridicat primăvara, ceea ce conduce la o creștere a susceptibilității la incendiu. Coroborat cu o perioadă de secetă și temperaturi ridicate, vegetația se aprinde mult mai ușor iar focul se răspândește rapid.

Panta terenului influențează curenții de aer, implicit modul de evoluție a incendiului. Pe de o parte, pe pante ridicate incendiul se răspândește mult mai rapid și totodată îngreunează procesul de intervenție

(imposibilitatea de acces a autospecialelor, trimiterea apei pe înălţime presupune un surplus de mijloace (motopompe, bazine intermediare) şi efort mare pentru manevrarea acestora.

Prezenţa turmelor de oi şi capre ca factor în influenţarea incendiilor poate fi interpretată bivalent: pe de o parte păşunatul reduce riscul la incendiu prin aceea că animalele reduc cantitatea de combustibil (stratul ierbos şi arbustiv) iar pe de altă parte indică o prezenţă antropică, care prin neglijenţă poate declanşa apariţia de incendii.

4.3 Determinarea suprafeţelor de pădure incendiate şi a gradului de severitate a incendiilor

Analiza diferiţilor indici regăsiţi în literatura de specialitate (Llorens, R. et al. 2021, Mallinis G. et al. 2018, Llorens, R. et al. 2021) a arătat că indicele dNBR a fost cel mai potrivit pentru estimarea severităţii incendiilor, oferind rezultate mai precise, cel puţin pentru zona noastră de studiu.

După efectuarea calculului indicilor, imaginile rezultate au fost preluate în aplicaţia ArcGIS, care prezintă facilităţi mai eficiente pentru vizualizare, definirea culorilor, suprapunere de straturi raster şi vector etc.

Imaginile indicilor sunt monocrome, având un singur strat, iar reprezentarea convenţională pentru imaginile digitale monocrome este realizată prin *valoarea maximă* = alb, *valoarea minimă* = negru, iar între acestea un număr de nuanţe de gri (proporţional cu ecartul valorilor numerice). Deoarece ochiul uman deosebeşte mai greu nuanţele de gri între ele, se procedează la o colorare convenţională folosindu-se o paletă de culori. În exemplele prezentate a fost aleasă o paletă de culori verde-roşu, valorile minime fiind reprezentate prin culoarea verde şi valorile maxime prin culoarea roşu.

Indicii de vegetaţie prezintă în general valori maxime pentru vegetaţia sănătoasă şi minime pentru vegetaţia afectată de factori perturbatori, în cazul de faţă de incendii.

Pentru a înţelege mai bine ce pun în evidenţă indicii calculaţi, s-a realizat comparaţia cu imaginile originale. Astfel, rezultatul indicelui clasic NDVI, adaptat la benzile Sentinel 2 (MSI) şi respectiv, al indicelui NBR au fost analizate comparativ cu imaginile originale, pentru imaginea înregistrată la data 01.08.2021 (înainte de începerea incendiilor în zonă) şi la data de 11.08.2021 (Figura 4.16).

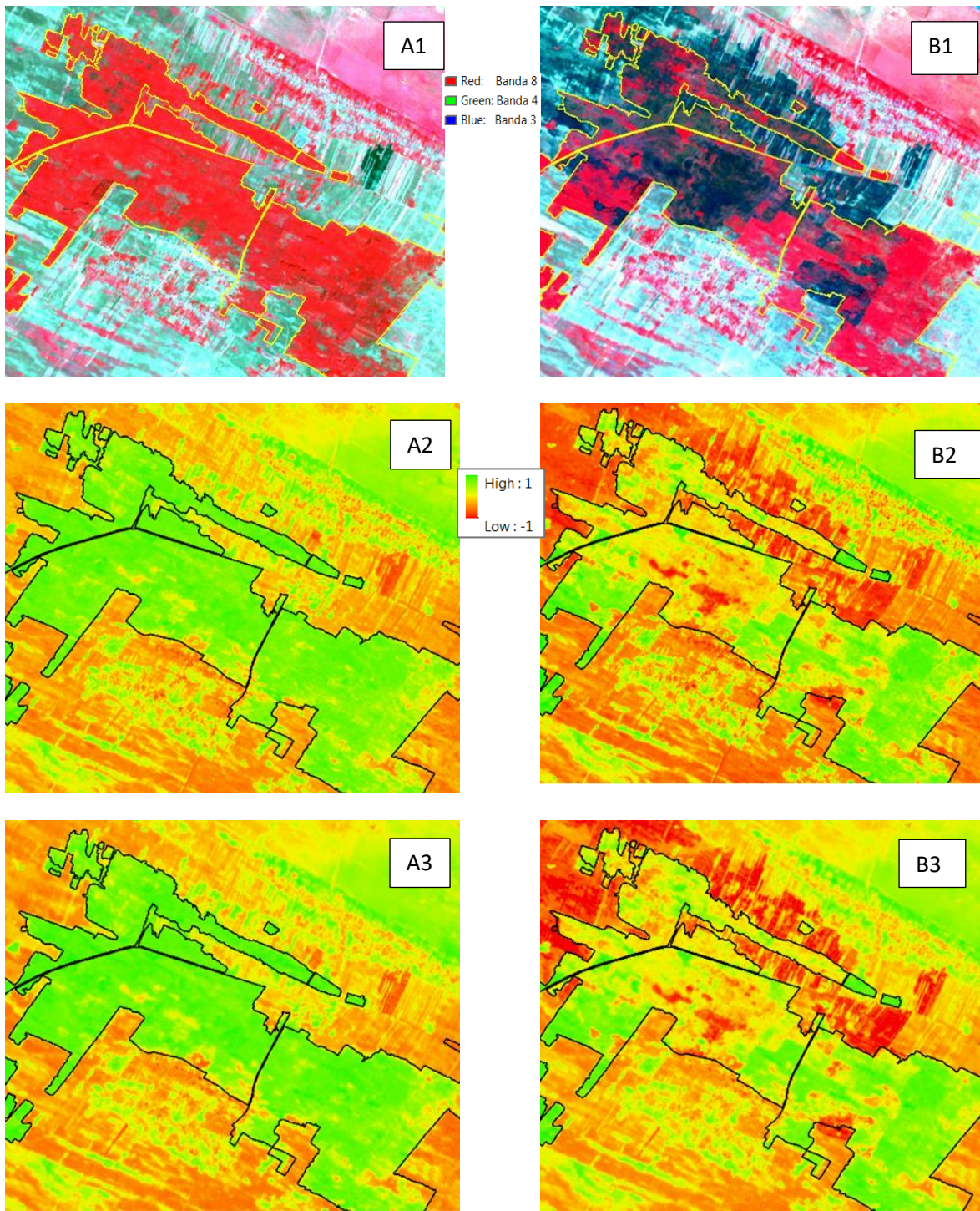


Figura 4.16. Comparația între imaginile Sentinel 2 originale pentru trupul de pădure Jiana din județul Mehedinți (A1 - 01.08.2021; B1 - 11.08.2021) , Infraroșu color (RGB 8-4-3), NDVI (feliere de densitate), (A - 01.08.2021; B2 - 11.08.2021) și NBR) (A3 - 01.08.2021; B3 - 11.08.2021). Cu linii galbene, respectiv negre sunt marcate limitele fondului forestier.

Indicii diferenţiali

Pentru a pune mai bine în evidenţă efectele produse de incendii se folosesc indici diferenţiali care reprezintă o diferenţă aritmetică simplă între valorile indicilor calculate din imaginea pre eveniment şi imaginea post eveniment. În cazul NBR obţinem indicele dNBR (*Differential Normalized Burn Index*), diferenţele dintre aceştia fiind evidenţiate pentru imaginea din data de 11 august 2021 (Figura 4.17).

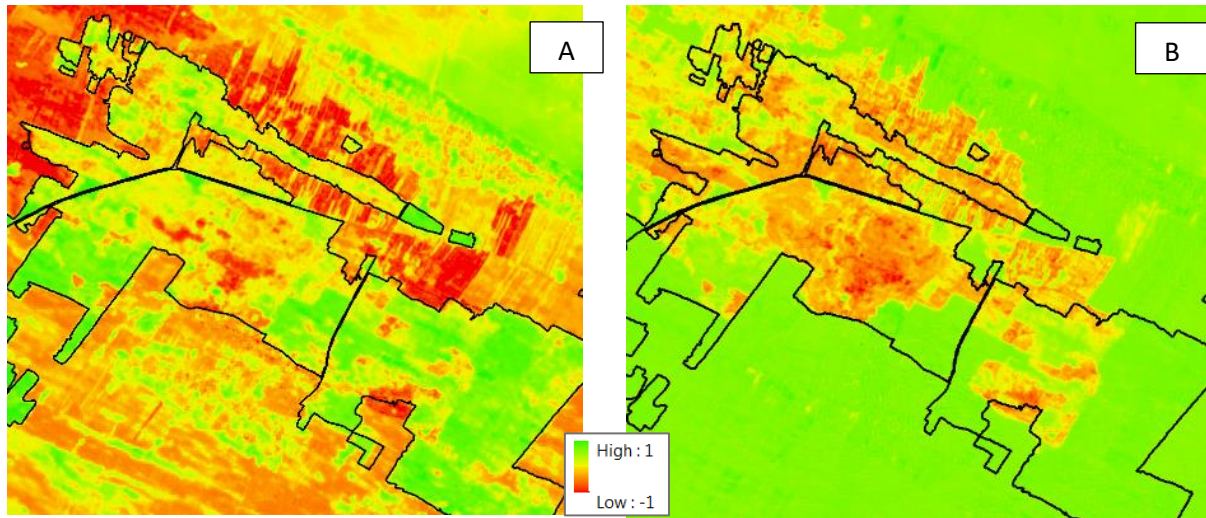


Figura 4.17. Comparaţia între indicii NBR (A) şi dNBR (B) (felii de densitate) a imaginii Sentinel 2 din data de 11.08.2021 (vezi figura 5 A2). Cu linii negre sunt marcate limitele fondului forestier (trupul de pădure Jiana din judeţul Mehedinţi)

În Figura 4.8 se observă că pe imaginea indicelui dNBR sunt puse în evidenţă (cu nuanţe de roşu) numai zonele afectate de incendii, în timp ce pe imaginea indicelui NBR sunt puse în evidenţă toate zonele cu vegetaţie redusă, indiferent de cauză (incendii sau teren arat pe zonele cu teren agricol). Acest efect este cvasi similar pentru toţi indicii de vegetaţie care se bazează pe valorile pixelilor din benzile roşu, infraroşu apropiat şi infraroşu mediu.

Pentru a se putea estima care indici propuşi în literatura de specialitate sunt mai adecvaţi estimării efectelor produse de incendiile de pădure, în zona test au fost calculaţi o serie de astfel de indici, pentru imaginea din data de 11 august 2001 şi au fost comparaţi vizual, utilizându-se colorarea cu aceeaşi paletă şi gradient de culori (Figura 4.18).

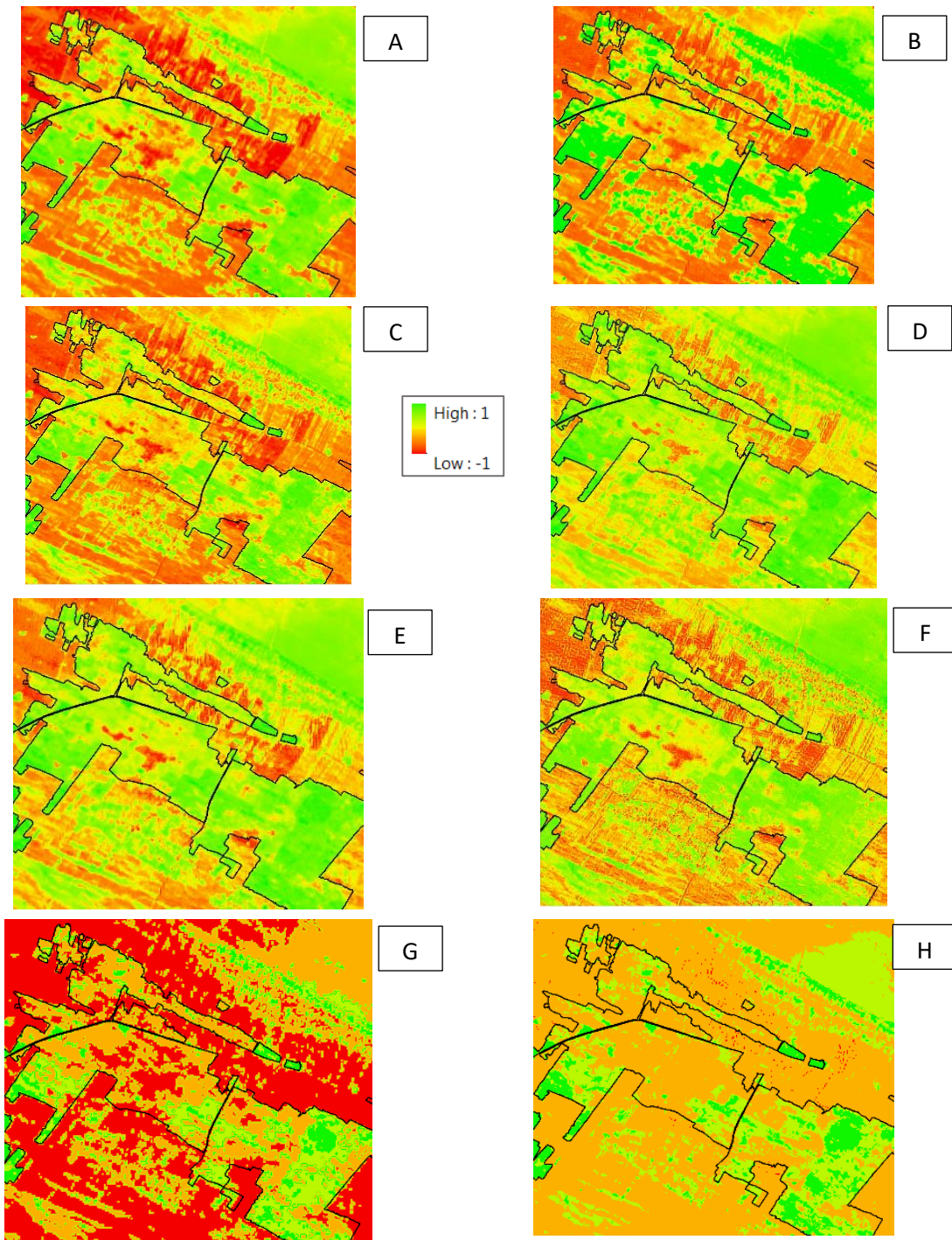


Figura 4.18. Comparația între imaginile indicilor A-NBRn, B-CIre, C-NDVI, D-GNDVI, E-NDVIre1, F-NDVIre1n, G-MSRre1, H-MSRre1n la data de 11.08.2021. Liniile de culoare neagră delimitează fondul forestier (trupul de pădure Jiana din județul Mehedinți).

Interpretarea vizuală a rezultatelor a indicat faptul că indicele diferențiat al raportului de ardere normalizat (dNBR) a condus la cele mai bune rezultate în estimarea severității incendiilor pentru zona de studiu. Clasele de severitate dNBR au fost clasificate inițial conform pragurilor stabilite de Key și Benson (2006), obținându-se astfel, clasele de severitate a arderii derivate din acest indice pentru una dintre zonele cele mai afectate de incendii (Figura 4.19).

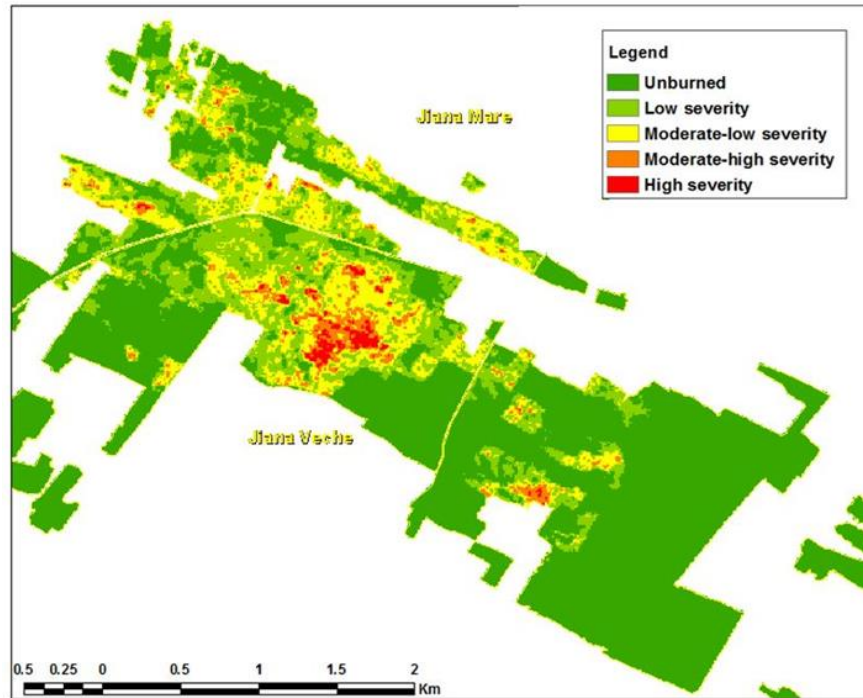


Figura 4.19. Indicele dNBR obținut din imagini Sentinel 2 la data de 2021-08-01 (ante-incendii), 2021-08-11 (post-incendii). Linia galbenă marchează limitele pădurii (trupul de pădure Jiana din județul Mehedinți).

Harta indicelui dNBR arată o distribuție a severității aparent apropiată de cea estimată vizual pe imaginea Sentinel 2 înregistrată la data de 11 august 2021. O analiză mai detaliată a arătat că severitatea arderii depinde de indicele de acoperire a coroanelor și de înălțimea arborilor, cel puțin în arboretele de salcâm, care natural au o acoperire mai redusă a coroanelor și, implicit, o densitate mai mică a acestora decât alte specii de foioase. Acest lucru a fost observat inițial pe imaginile Sentinel 2 înainte de incendiu (01 august 2021), pe imaginile aeriene (30 mai 2015) și a fost confirmat și în teren. Relația dintre indicele dNBR și acoperirea coroanelor confirmă faptul că un grad de acoperire redus al coronamentului indică o severitate înaltă falsă pe harta indicelui dNBR și viceversa, din cauza faptului că iarba și stratul subarbustiv arse sunt mai vizibile de sus și mai abundente în arboretele cu densitate redusă. De asemenea, o înălțime redusă a arborilor induce o severitate înaltă pe dNBR, flăcările și căldura produse de subarboretul ars ajungând ușor la nivelul coroanelor. Această observație a fost prin urmare, utilizată pentru ajustarea hărții de severitate a incendiului. Următoarea etapă a constat în verificarea ipotezei potrivit căreia clasele de severitate determinate pe imaginile satelitare corespund cu gradele de afectare reale din teren. În acest sens s-a realizat o campanie de teren pentru verificarea corespondenței claselor de severitate a arderii cu impactul real al incendiilor. S-a constatat că severitatea estimată pe imaginile satelitare/aeriene nu corespunde întocmai cu severitatea constatată pe teren. Astfel, în urma incendiilor

din vara anului 2021 în județul Mehedinți, s-a constatat ca la arboretele tinere de salcâm (s-au considerat arborete tinere cele cu înălțimea până la 10 m, aceasta fiind limita aproximativă până la care căldura degajată de incendiile de suprafață afectează frunzișul) sunt cele mai afectate de incendiile de suprafață (alimentate de iarba înaltă și uscată, litieră și uneori statul arbustiv). Arboretele cu înălțimea medie mai mare de 10 m au fost cel mai puțin afectate, deoarece scoarța mai groasă și înălțimea coronamentului le face mai puțin vulnerabile. Estimarea severității pe imagini tinde să fie supraestimată în cazul arboretelor scunde și subestimată în cazul arboretelor înalte, comparativ cu cea estimată pe teren.

Harta raster a distribuției indicelui dNBR a fost convertită într-o hartă vectorială reprezentând cele 5 clase severitate. Aceasta a fost ulterior intersectată cu stratul care reprezintă acoperirea coroanelor și clasele de înălțime ale arborilor. Astfel, clasele de severitate au fost ajustate conform cheii de corectare din Tabelul 4.8 obținându-se noua hartă a gradului de severitate al incendiilor (Figura 4.20).

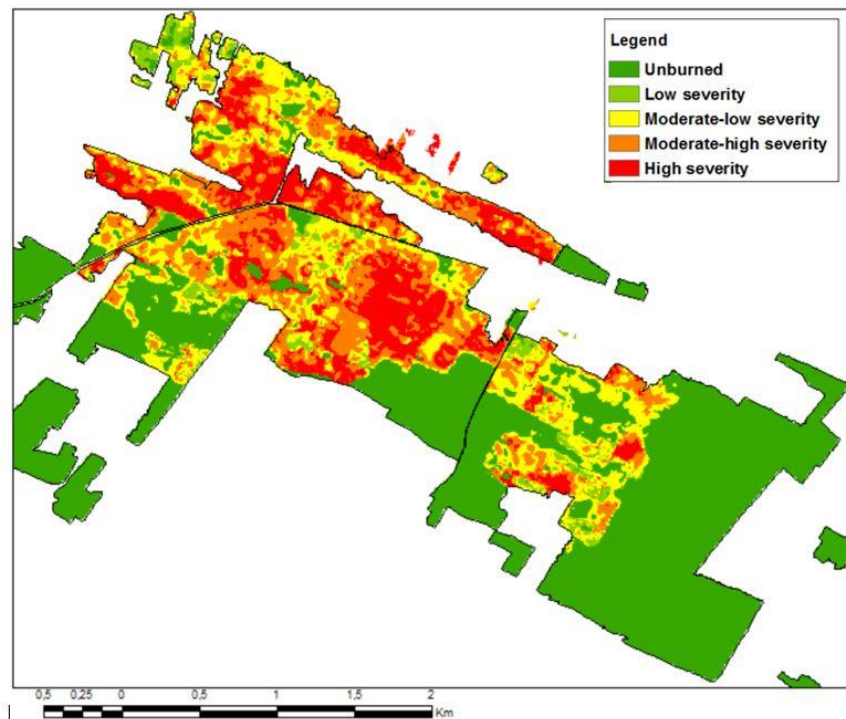


Figura 4.20. Noua hartă de severitate corectată pe baza indicelui de acoperire a coroanelor și înălțimea arborilor. Linie neagră marchează limitele pădurii (trupul de pădure Jiana din județul Mehedinți).

Arboretele cu acoperire redusă a coroanelor, dar cu arbori înalți, ar putea avea în realitate o severitate mai mică rezultată din dNBR deoarece, dacă doar combustibilul de la suprafață este ars și arborii nu sunt afectați în mod real, semnalul provenind de la sol va fi domina și deci, indicele dNBR va avea o valoare ridicată. În arboretele dense și mai înalte, cu aceeași severitate a suprafeței arse, semnalul va fi dominat de coroane, care sunt mai puțin afectate. Aceste arborete ar putea arăta pe harta dNBR ca neafectate sau slab afectate, chiar dacă severitatea reală ar putea fi diferită (de la "joasă" la "mijlocie-joasă" sau chiar mai mare), dacă coroanele superioare nu au fost afectate. În cazul altor specii de arbori din zonă, cum ar fi pinul silvestru, efectul a fost mai grav, arboretele fiind arse până în vârf și severitatea evidențiată de dNBR a fost mai aproape de realitate. Gibson et al. (2020) au constatat, de asemenea, utilizând imagini

Sentinel 2 pentru a evalua severitatea incendiilor în Australia de Est, că o acoperire mai mare a coroanelor și o complexitate topografică mai mare au fost asociate cu o rată mai mare de subestimare, din cauza limitărilor vizualizării subarboretului ars în clasele de severitate scăzută.

În ceea ce privește suprafața de pădure afectată de incendii în cele două trupuri de pădure pe perioada analizată, suprafața obținută din datele MODIS totalizează 859,47 ha, din care 493,30 ha în trupul de pădure Jiăna și 366,17 ha în trupul de pădure Pătulele. Din datele raportate de către administrația silvică, suprafața totală incendiată pentru trupul Jiăna a fost de 308,65 ha (7 incendii), iar pentru trupul Pătulele a fost de 303,3 ha (4 incendii) cu un total pe cele două trupuri de 611,85 ha. Se constată o diferență în plus de 247,62 ha (40,47%) a suprafeței totale arse determinată după imaginile MODIS comparativ cu datele de teren. Menționăm că suprafețele incendiate descărcate de pe platforma EFFIS sunt determinate în baza imaginilor zilnice MODIS cu rezoluția spațială de 250 m, iar perimetrele incendiilor sunt rafinate din anul 2018 prin utilizarea și a imaginilor Sentinel 2 cu rezoluția de 20 m. Ca urmare a rezoluției spațiale scăzute, senzorul MODIS tinde să nu surprindă incendiile pe suprafețe mici, performanța acestuia la detectarea incendiilor crescând pe măsură ce mărimea incendiilor crește (Coskuner 2022, Katagin și Gitas (2022)).

4.4 Detectarea și localizarea incendiilor de pădure și urmărirea evoluției acestora pe baza imaginilor satelitare de înaltă rezoluție temporală

Un exemplu de detectare și localizare a incendiilor de pădure în timp cvasi-real pe baza imaginilor satelitare de înaltă rezoluție temporală este cel care prezintă situația incendiului în cazul trupului de pădure Pătulele, unde un incendiu pe o suprafață agricolă declanșat în data de 9 august, 2021 s-a extins ulterior și în fondul forestier. Astfel, imaginea Sentinel 2 înregistrată la 6 august în același an, prezintă situația înainte de declanșarea incendiilor (Figura 4.21).



Figura 4.21. Imagine Sentinel 2, trupul de pădure Pătulele, județul Mehedinți. Situația la data 6 august, 2021 în care se prezintă punctele semnalizate de senzorul MODIS.

În data de 9 august, 2021 apare un incendiu pe terenul agricol din nord-vestul trupului. Imaginea surprinde extinderea incendiului la ora 9:30 GMT (12:30 ora locală, oră de vară), moment în care se semnalizează apariția incendiului și în fond forestier (Figura 4.22). Se observă, de asemenea, pana de fum și chiar foc deschis pe terenul agricol. Este de menționat că, la acea oră, vântul bătea cu aproximativ 5 km/h din direcția nord-est (datele meteorologice au fost descărcate de pe site-ul <https://www.visualcrossing.com/weather/weather-data-services>). Se remarcă astfel, punctele semnalizate de produsul MODIS care indică apariția și propagarea incendiului la data de 9 august, 2021.

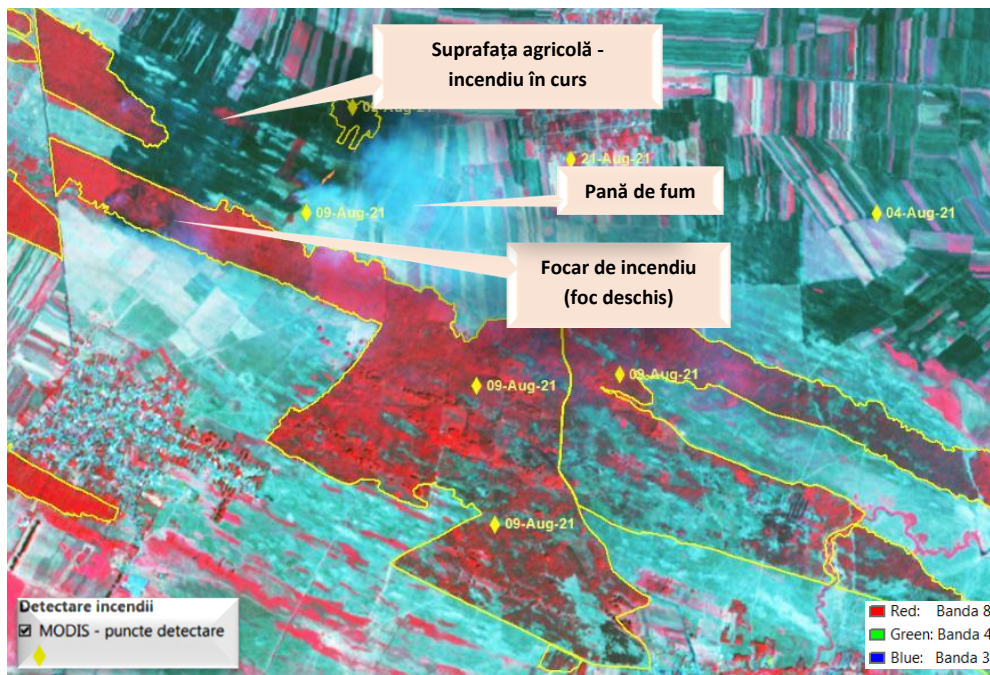


Figura 4.22. Imagine Sentinel 2, trupul de pădure Pătulele, județul Mehedinți. Situația la data de 9 august 2021 în care sunt prezentate punctele semnalizate de senzorul MODIS

Următoarea imagine Sentinel 2 disponibilă a fost înregistrată la data de 11 august 2021 (Figura 4.23). Pe această imagine se observă extinderea finală a incendiului atât pe terenul agricol cât și în fondul forestier. Incendiul s-a propagat rapid de pe terenurile agricole în fondul forestier, în aceeași zi, după cum indică semnalizările senzorului MODIS. Suprafața afectată extrasă de pe imaginea MODIS coincide foarte bine cu cea vizibilă pe imaginea Sentinel 2, în special în partea de Est a trupului Pătulele.

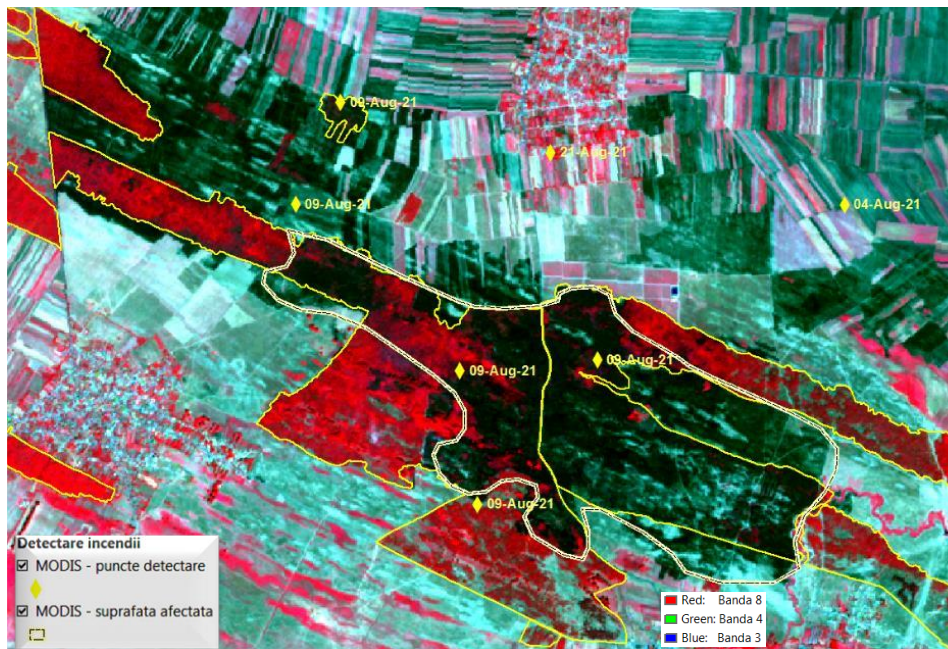


Figura 4.23. Imagine Sentinel 2, trupul de pădure Pătulele, județul Mehedinți. Situația la data 11 august 2021 în care sunt prezentate punctele semnalizate de senzorul MODIS.

În ceea ce privește situația declanșării incendiului, aceasta a fost analizată pe o imagine satelitară PlanetScope Dove, înregistrată în data de 09.08.2021 ora 8:30 GMT. O serie de imagini ale unui detaliu din suprafața trupului de pădure Pătulele, unde s-a declanșat incendiul sunt prezentate pentru a evidenția etapele din evoluția acestuia (Figura 4.24). Pe imaginea Sentinel 2 din data de 6.08.2021 (Figura 4.24A) se poate remarca faptul că locul unde apare incendiul în fond forestier este reprezentat de un mic gol în pădure. Aceasta sugerează că focul s-a propagat prin litieră, fapt confirmat și de observațiile efectuate în teren. Pe imaginea satelitară PlanetScope Dove, înregistrată în data de 09.08.2021 la ora 8:30 GMT (11:30 ora locală, oră de vară), cu o oră înainte de trecerea satelitului Sentinel 2 se observă suprafața agricolă arsă, incendiul este în curs și s-a propagat și în suprafața de pădure din sud, unde este la început (Figura 4.24B). Pe imaginea Sentinel 2 din 09.08.2021 ora 9:30 GMT (12:30 ora locală, oră de vară), deci cu o oră după imaginea PlanetScope Dove, se observă că incendiul s-a propagat atât pe suprafața agricolă cât și în pădure, fiind semnalat și foc deschis pe suprafața agricolă (Figura 4.33C). Din analiza comparativă a Figura 4.24B și 4.24C se poate observa faptul că focul s-a propagat într-o oră pe o distanță de aproximativ 500 m (măsurată pe imagine, în mediu GIS), favorizat și de vântul din nord-est, care sufla la acea oră.

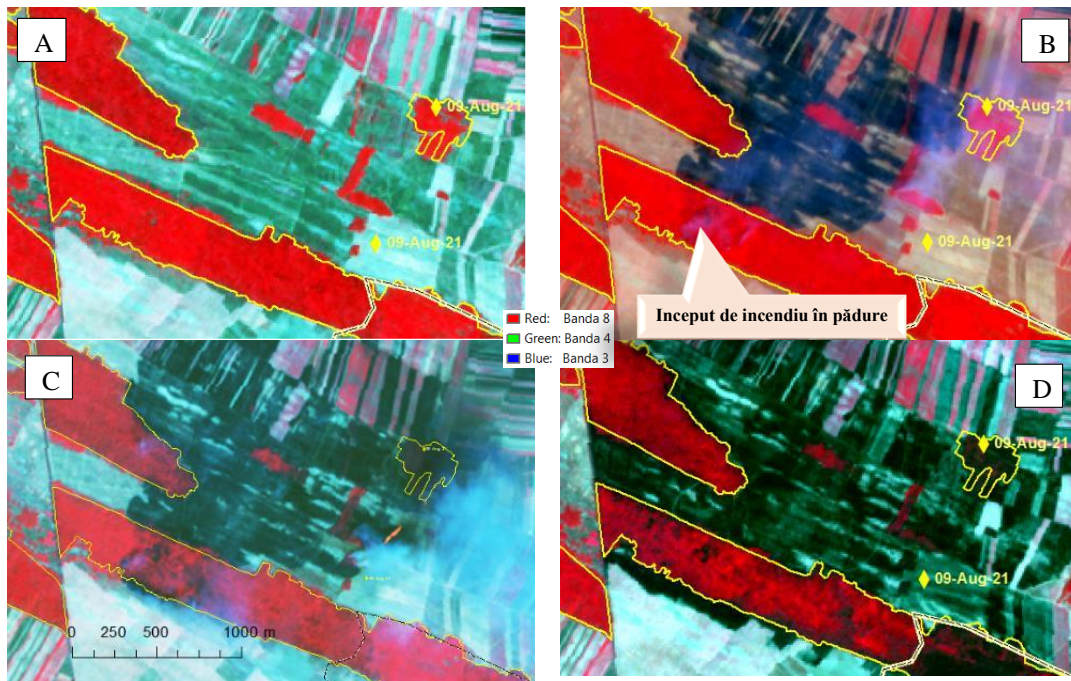


Figura 4.24. Trupul de pădure Pătulele – detaliu. A) Imagine Sentinel 2, 06.08.2021: nu a apărut vreun focar de incendiu; B) Imagine PlanetScope Dove, 09.08.2021 ora 8:30 GMT: suprafață agricolă arsă, incendiu în curs s-a propagat și în suprafața de pădure din sud; C) Imagine Sentinel 2 (09.08.2021 ora 9:30 GMT): incendiu în curs, atât pe suprafața agricolă cât și în pădure; se observă și foc deschis; D) Imagine Sentinel 2, 11.08.2021: efectul incendiului

Astfel, din combinarea diferitelor surse de date de teledetecție s-a reușit reconstituirea evoluției incendiilor din luna august a anului 2021 în cadrul trupurilor de pădure Pătulele și respectiv Jiana. Datele MODIS și VIIRS au semnalat corect focarele de incendiu active în zonă, fapt confirmat atât de rapoartele de incendii ale structurilor de administrație silvică (ocoale silvice) cât și de imaginile satelitare Sentinel 2 și PlanetScope Dove.

5. CONCLUZII

În urma cercetărilor efectuate, a prelucrării informațiilor și analizei rezultatelor obținute în cadrul tezei de doctorat, se pot formula concluzii pertinente, fundamentate pe baze științifice, care contribuie la dezvoltarea cunoașterii în ceea ce privește utilizarea tehnicilor și procedeele specifice geomatiei în activitatea evaluare a hazardului la incendii de pădure, monitorizarea incendiilor active și analiza impactului acestora, după cum urmează:

- **Cu privire la cartarea tipurilor de combustibili de pe teritoriul României**

Combinarea seturilor de date geo-spațiale vectoriale cu datele de teledetecție satelitară a făcut posibilă obținerea, prin metoda de cartare indirectă, a hărții distribuției tipurilor de combustibili vegetali (la scară mare (națională), pornindu-se de la informațiile care descriu distribuția vegetației și echivalarea acestora cu tipurile de combustibili. A fost de asemenea posibilă obținerea hărții densității vegetației forestiere (gradul de acoperire al coroanelor arborilor) pe baza datelor satelitare MODIS (produsul MOD44B) iar prin combinarea tipurilor de ecosisteme forestiere la nivel național cu informațiile oferite de harta tematică privind acoperirea terenurilor (Corine Land Cover 2018) din care s-au extras clasele de vegetație non-forestieră s-au evidențiat 20 de clase de combustibili vegetali care cuprind suprafețele acoperite de păduri, terenurile agricole cât și cele de tranziție de agricol la forestier, din care cel mai adesea sunt inițiate incendiile care ulterior se extind în fondul forestier. Fiecare tip de combustibil reprezintă în același timp un model de combustibil întrucât reprezintă „o asociere identificabilă a elementelor de combustibilitate aparținând unor specii distinctive: formă, mărime, continuitate, care prezintă un comportament caracteristic la foc în condiții de ardere definite”. Aceste tipuri de combustibili pot fi identificate și evidențiate pe viitor în detaliu la scară mică (locală), în cadrul unei activități care presupune măsurători intensive în teren pentru calibrarea și rafinarea rezultatelor.

Totodată, pe baza indicilor de combustibilitate pentru principalele specii de arbori și arbuști din pădurile României, stabiliți în raport cu densitatea lemnului, viteza de ardere și puterea calorică (Adam, 2006) a fost posibilă, utilizând harta tipurilor de ecosisteme (Doniță et al., 2008), echivalarea acestor indici de combustibilitate la nivel de tip de ecosistem și în final, realizarea hărții indicilor de combustibilitate pentru ecosistemele forestiere din România, în format digital. Pentru a fi compatibil cu aplicațiile software utilizate pentru modelarea comportamentului incendiului de combustibilitate, formatul acesteia a fost ulterior convertit din format vectorial în format raster cu rezoluția de 30X30 m. Datorită conținutului de rășinoase și densității mai mici a lemnului, s-a evidențiat faptul că zonele ocupate de rășinoase au o combustibilitate mai mare decât cele specifice foioaselor. Așadar, pentru înțelegerea modului de propagare a incendiilor de pădure este necesară nu numai cunoașterea distribuției combustibililor reprezentați de vegetația forestieră, ci și a celor aparținând altor grupe și asociații vegetale, datorită atât distribuției mozaicat (intercalat) a acestora cât și tendinței actuale de a se trata incendiile, pentru o gestionare integrată a riscului, la nivel de complex ecosistemic. Totodată, sistemele de clasificare a tipurilor de combustibili la nivel european pun accent, în mod special, pe complexe ecosistemice mediteraneene, care istoric, sunt cele mai afectate de incendii și mai puțin pe biomurile din a zonele boreală sau temperată. Nici sistemele americane sau canadiene nu pot fi preluate ca atare pentru cazul României, astfel că se impune găsirea unei variante optime de combinare și adaptare a acestora la specificul național. Astfel, cu ocazia cercetărilor efectuate a fost elaborată clasificare a tipurilor de combustibili adaptată la specificul vegetației forestiere și non-forestiere la nivelul României.

- **Cu privire la realizarea bazei de date geo-spaţială a evenimentelor de incendiu istorice produse în perioada anilor 2006-2023**

Centralizarea informaţiilor existente privind incendiile de pădure pentru perioada 2006-2023 pentru teritoriul României a evidenţiat o mare variabilitate anuală şi intra-anuală a acestora. Astfel, în urma unui sezon de incendiu excepţional cum a fost cel produs în anul 2012, a urmat o perioadă de câţiva ani de relativă linişte în ceea ce priveşte manifestarea incendiilor de pădure, după care un alt an (2022) cu o manifestare excepţională a acestui fenomen, a fost înregistrat. Aceasta se poate explica pe de o parte prin faptul că anii de secetă prelungită se manifestă cu o oarecare ciclicitate iar pe de altă parte, în urma unui sezon intens de incendii în pădure se consumă combustibilii de la suprafaţa solului (litieră, crengi uscate etc.) şi durează o perioadă de câţiva ani până când aceştia se acumulează din nou în cantităţi însemnate. Variabilitatea intra-anuală a incendiilor de pădure poate fi explicată de manifestarea sezonieră a acestora, cu un maxim înregistrat în perioada de primăvară (martie-aprilie) şi un altul, dar mai redus ca intensitate, în lunile iulie-august. Reprezentarea spaţială a incendiilor de pădure a pus totodată în evidenţă faptul că acestea au o mare variabilitate spaţială la nivelul ţării, respectiv există o "zonă fierbinte" în sud-vestul României alcătuită din judeţele Mehedinţi şi Gorj. Zona subcarpatică este de asemenea mai predispusă la incendii, în timp ce în zona montană înaltă incendiile de pădure au o manifestare relativ redusă.

Modul de colectare şi înregistrare a evenimentelor de incendiu ar putea fi îmbunătăţit prin implementarea unui sistem informatic de tip geoportal care să permită introducerea standardizată şi unitară a datelor precum şi localizarea precisă a punctelor de incendii. Este necesară totodată corelarea evidenţelor de incendii din fondul forestier realizate de structurile silvice cu cele realizate de către pompierii militari.

- **Cu privire la testarea şi validarea unor metode geo-spaţiale pentru identificarea şi analiza factorilor determinanţi pentru apariţia incendiilor de pădure:**

În urma comparării zonării hazardului prin cele două modele analizate (i.e. *Random Forest* şi *regresia logistică*) se remarcă un consens între acestea cu privire la identificarea zonelor cele mai vulnerabile din ţara noastră, respectiv judeţele Mehedinţi şi Gorj. Utilizând regresia logistică, rezultă că zona de hazard ridicat este însă mai extinsă, cuprinzând suprafeţe semnificative şi din judeţele Vâlcea, Argeş, Olt dar şi judeţele Galaţi şi Brăila, acestea din urmă nefiind recunoscute până în prezent ca având probleme deosebite cu acest tip de dezastru. Astfel, modelul *Random Forest* a condus la identificarea unei zone mai restrânse decât modelul *regresiei logistice* cu gradul cel mai ridicat de pericol de manifestare a incendiilor de pădure, concentrată îndeosebi în punctele de maximă densitate a incendiilor istorice, în timp ce zona cu risc mediu-ridicat şi ridicat este mai extinsă în cazul regresiei logistice, fapt care ar putea fi explicat şi de faptul că acest model ia în considerare mai mulţi parametri climatici. Această diferenţă în ponderea claselor a fost pusă în evidenţă şi în urma validării modelelor pe baza arhivei de incendii aparţinând sensorului satelitar VIIRS.

Hărţile de hazard la incendii, atât cea obţinută prin modelul *regresiei logistice* cât şi cea obţinută prin modelul *Random Forest* au evidenţiat faptul că cele mai predispuşe la incendii de pădure sunt zonele subcarpatice în care terenurile agricole sunt intercalate cu păduri şi aşezări umane. Coroborând totodată zonele cu frecvenţe ridicate la incendii cu statistica producerii lunare a acestora, se desprinde ipoteza potrivit căreia incendiile de pădure se produc în funcţie lucrările de management al vegetaţiei, practicate de localnici, respectiv primăvara, pentru curăţarea de resturi vegetale păşunile şi livezile se incendiază, cea mai afectată zonă fiind cea de deal, iar în zona de câmpie şi în Dobrogea se înregistrează un maxim pe timpul verii ca urmare a practicilor de ardere a miriştilor şi

resturilor agricole. Totodată pe timpul verii, creşte incidenţa incendiilor şi în zona montană, când se înregistrează un maxim de activitate şi prezenţă umană, ca urmare a intensificării activităţii turistice.

Din punctul de vedere al *factorilor determinanţi* selectaţi ca influenţând apariţia incendiilor de pădure, se poate afirma că ambele modele au pus în evidenţă faptul că incendiile de pădure sunt determinate de un cumul de factori climatici (temperaturile extreme şi precipitaţiile reduse), topografici (altitudinea, panta, expoziţia), antropici (densitatea populaţiei, densitatea drumurilor, proximitatea terenurilor arabil şi a păşunilor) precum şi de specificul vegetaţiei (acoperirea cu arbuşti, indicele NDVI).

Pe baza celor prezentate se poate afirma faptul că ambele metode testate pentru zonarea hazardului, *regresia logistică* şi modelul *Random Forest*, prezintă o limitare importantă ce trebuie subliniată şi anume faptul că acurateţea rezultatelor este dependentă atât de calitatea cât şi de varietatea variabilelor explicative geospaţiale utilizate la rularea modelelor respective. Acest neajuns poate fi redus prin actualizarea constantă a acestor informaţii cât şi generarea lor la grade de precizie şi de detalii mai mari. Acest lucru însă poate avea ca rezultat zonări ale hazardului care să difere semnificativ între ele, ceea ce ar obstrucţiona o comparaţie temporală judicioasă a zonelor predispuse la incendii de pădure. Acest lucru ar putea fi evitat prin utilizarea pentru zonarea hazardului doar a hărţii obţinute pe baza densităţii de probabilitate *kernel* întrucât aceasta este generată exclusiv pe baza punctelor de incendii şi deci, rezultatele pot fi comparate între ele dacă se generează o nouă ediţie a hărţii ca urmare a adăugării de noi serii anuale de puncte de incendii. Cu toate acestea, aceste două modele de analiză predictivă (*regresia logistică* şi *Random Forest*) pot oferi informaţii preţioase despre factorii implicaţi în regimul incendiilor de pădure şi relaţiile dintre acestea, cu potenţiale consecinţe asupra modului de gestionare a acestui tip de hazard.

- **În ceea ce priveşte detectarea incendiilor de pădure în timp cvasi-real şi urmărirea evoluţiei propagării incendiilor după date satelitare Sentinel 2 şi PlanetScope Dove:**

Prin combinarea datelor satelitare de medie şi înaltă rezoluţie spaţială (i.e. Sentinel 2 şi PlanetScope Dove) cu punctele focarelor de incendiu din platforma EFFIS (*European Forest Fire Information System*), s-a reuşit reconstituirea cu fidelitate satisfăcătoare a evoluţiei propagării incendiilor de la momentul iniţierii şi până la stingerea acestora. Astfel, s-a reuşit inclusiv evidenţierea faptului că incendiile din zona de studiu s-au aprins iniţial în terenuri agricole după care s-au extins în terenurile forestiere limitrofe. Utilizarea exclusivă a imaginilor satelitare Sentinel 2 în acest scop este însă insuficientă, iar dezavantajul imaginilor PlanetScope Dove este că se achiziţionează contra-cost. Totuşi, ar putea fi utilizate suplimentar şi imagini satelitare Landsat 9 pentru a îmbunătăţii astfel intervalul temporal dintre două imagini succesive pentru aceeaşi zonă. De menţionat este faptul că metoda este aplicabilă doar cu condiţia ca cerul să nu fie acoperit de nori pe zona incendiată.

Punctele de igniţie ale incendiilor derivate din datele senzorilor satelitari cu mare rezoluţie temporală (MODIS şi VIIRS) şi furnizate de EFFIS au surprins corect punctele de iniţiere/focarele incendiilor de pădure analizate în zona de cercetare din comunele Jiana şi Pătulele din judeţul Mehedinţi. Prin urmare se recomandă utilizarea acestor sisteme bazate pe utilizarea teledetecţiei pentru alertarea incendiilor către echipele de intervenţie în zonele nepopulate unde incendiile nesemnificate la timp se pot extinde într-un mod alarmant. Trebuie ţinut cont de faptul că sateliţii care transportă senzorii MODIS trec deasupra aceleaşi zone o dată la 1-2 zile, iar senzorii VIIRS de 4

ori pe zi, prin urmare informațiile furnizate de aceștia nu țin locul unei avertizări timpurii, care poate fi realizată prin îmbunătățirea sistemelor de monitorizare terestre.

- **În ceea ce privește cartarea suprafețelor de pădure afectate de incendii și estimarea severității incendiilor de pădure pe baza imaginilor satelitare Sentinel 2:**

Rezultatele obținute prin evaluarea impactului incendiilor după producerea acestora, permit exprimarea adevărului potrivit căruia atât suprafețele afectate de incendiu cât și estimarea gradului de severitate al efectelor incendiilor pot fi derivate cu suficientă acuratețe din imaginile Sentinel 2. În acest mod se vine în sprijinul unor raportări mai judicioase a impactului incendiilor, în special atunci când acestea se produc pe zone extinse și în sprijinul personalului silvic și a altor instituții care raportează suprafețele afectate de incendii,

Prin analiza comparativă a celor mai populari indici spectrali utilizați în știința incendiilor de vegetație s-a confirmat faptul că Raportul Diferențial Normalizat al Arderii, calculat ca raport între valorile din benzile aferente infraroșu apropiat și infraroșu mediu, oferă cele mai bune rezultate pentru cartarea suprafețelor incendiate și estimarea severității incendiilor în cazul pădurilor de salcâm din zona de câmpie. Este necesar ca treptele de severitate a incendiilor, stabilite ca praguri de valori a Raportului Diferențial Normalizat al Arderii, să fie calibrate local întrucât valorile indicelui sunt influențate de compoziția și structura pe verticală și orizontală a arboretelor cât și de topografia terenului. Astfel, s-a pus în evidență faptul că, pentru o estimare mai precisă a nivelurilor de severitate a incendiilor pe baza imaginilor satelitare, este necesar să se ia în considerare influența pe care o exercită densitatea și înălțimea arborilor asupra severității. Potrivit cercetărilor, severitatea incendiilor în pădurile de salcâm din cele două zone forestiere studiate este asociată cu gradul de acoperire a coroanelor și înălțimea arborilor. Corelația dintre indicii dNBR și densitatea arborilor este negativă, ceea ce semnifică faptul că o densitate redusă a coroanelor poate indica o afectare mai mare în imagini satelitare, deoarece vegetația erbacee și stratul inferior al arborilor sunt mai vizibile și mai proeminente pe aceste imagini. În plus, arborii cu înălțime redusă (sub 10 m) sunt mai susceptibili la incendii din cauza căldurii generate de arderea vegetației erbacee și a stratului de frunze, care se propagă mai ușor în coroanele arborilor, ceea ce conduce la valori mai mari ale indicelui de severitate a incendiilor.

În cazul zonei de cercetare analizată, suprafața totală incendiată cartată pe baza imaginilor Sentinel 2 a diferit semnificativ față de cea obținută din cumularea suprafețelor din rapoartele structurilor de administrație silvică, aceasta fiind cu 24% mai mare. Pentru a se analiza în ce măsură raportările oficiale diferă de suprafețele estimate prin metode de teledetecție și care sunt cauzele neconcordanțelor dintre acestea, se recomandă extinderea cercetărilor în cadrul unor serii de incendii reprezentative statistic, stratificate pe forme de relief, tipuri de incendii și tipul de ecosisteme forestiere. Totuși, estimările suprafețelor de pădure incendiate se realizează cu o acuratețe satisfăcătoare de către sateliții MODIS, în special în cazul incendiilor care se manifestă pe suprafețe mari și în arborete cu densitate mai redusă, întrucât rezoluțiile spațiale scăzute ale senzorilor au limitări în cazul cartării incendiilor de litieră dezvoltate sub arborete închise, cu densitate ridicată. Acest fapt a fost pus în evidență prin cartarea suprafețelor afectate de incendii în arborete de salcâm cu ajutorul imaginilor satelitare Sentinel 2, și compararea rezultatelor cu perimetrele suprafețelor arse EFFIS derivate din imaginile MODIS care prezintă o rezoluție spațială semnificativ mai redusă (i.e. 10 m versus 250 m).

*

Cercetările întreprinse în cadrul tezei de doctorat au evidențiat potențialul deosebit pe care datele de teledetecție satelitară combinate cu date geospațiale vectoriale provenite din diferite surse îl oferă gestionării riscului la dezastrele naturale provocate de incendiile de pădure atât în faza de prevenție și pregătire, de detectare – alarmare, cât și în faza de analiză post eveniment. Rezultatele științifice obținute constituie câteva dintre soluțiile, modelele și tehnologiile geo-spațiale ce pot oferi factorilor interesați (autorități, structuri de intervenție, administratori și proprietari de păduri, societăți civile etc.), informații utile reducerii impactului acestui tip de dezastru asupra complexelor ecosistemice în general și asupra celor forestiere, în principal.

6. CONTRIBUȚII ORIGINALE

Rezultatele obținute și concluziile desprinse pe baza acestora, în urma efectuării cercetărilor desfășurate cu ocazia elaborării tezei de doctorat, au evidențiate realizări și contribuții personale cu caracter de originalitate, cu privire la potențialul deosebit pe care datele de teledetecție satelitară combinate cu date geospațiale vectoriale provenite din diferite surse îl oferă gestionării riscului la dezastrele naturale provocate de incendiile de pădure, după cum urmează:

- Actualizarea bazei de date geospațiale privind evenimentele de incendii de pădure din România prin integrarea informațiilor existente în perioada 2019-2023, realizându-se astfel trecerea de la datele înregistrate în format tabelar la date referențiate geografic care oferă posibilitatea reprezentării și evidențierii variabilității spațiale a incendiilor de pădure la nivelul țării.
- Realizarea unei hărți îmbunătățite a tipurilor de combustibili vegetali pentru întreg teritoriul României care include nu doar combustibilii forestieri ci și pe cei non-forestieri (terenurile agricole și cele de tranziție de la teren agricol la teren forestier) vegetația forestieră fiind segmentată în funcție de densitatea acesteia (gradul de acoperire al coroanelor arborilor).
- Elaborarea, în premieră pentru țara noastră, pe baza indicilor de combustibilitate stabiliți în raport cu densitatea lemnului, viteza de ardere și puterea calorică a principalelor specii de arbori și arbuști și a distribuției tipurilor de ecosisteme din România, a hărții indicilor de combustibilitate pentru ecosistemele forestiere, în format digital.
- Fundamentarea implementării unui sistem informatic de tip geoportal, bazat pe modul de colectare și înregistrare a evenimentelor de incendiu, care să permită introducerea standardizată și unitară a datelor precum și localizarea precisă a punctelor de incendii.
- Testarea și compararea a două metode de modelare a hazardului la incendii de pădure pentru teritoriul României (*regresia logistică* și *Random Forest*), dintre care una a fost aplicată pentru

prima dată în țara noastră (i.e. *Random Forest*) fapt ce a condus la evidențierea zonelor din România în care pericolul la acest tip de dezastru este ridicat.

- Elaborarea hărților de hazard la incendii prin utilizarea modelelor regresiei logistice și *Random Forest* și evidențierea faptului că cele mai predispușe la incendii de pădure sunt zonele subcarpatice caracterizate printr-un caracter mozaicat pronunțat al acoperirii terenurilor (agricolă, localități, păduri, alte categorii de vegetație forestieră etc.)
- Evidențierea, prin metode de analiză geospațială, a factoriilor favorizanți la incendiile de pădure din România și a relațiilor dintre aceștia, validând-se și dezvoltându-se rezultatele cercetărilor anterioare potrivit cărora, apariția incendiilor de pădure este cauzată de un cumul de factori topografici, climatici, antropici și de vegetație, care se intercondiționează între ei.
- Dezvoltarea, pentru prima dată în România, a unei metode pentru reconstituirea cu fidelitate a evoluției propagării incendiilor de la momentul inițierii și până la stingerea acestora pe baza imaginilor satelitare optice Sentinel 2 și respectiv PlanetScope Dove, în combinație cu punctele de incendii active generate de platforma EFFIS (*European Forest Fire Information System*).
- Verificarea acurateții raportărilor structurilor de administrație silvică privind suprafețele afectate de incendii prin compararea cu cele afectate și determinate pe baza pe indicelui diferențial normalizat al arderii obținut din imagini satelitare optice Sentinel 2, evidențiindu-se diferențe semnificative între aceste suprafețe precum și oportunitatea utilizării datelor și tehnologiilor de teledetecție satelitară în sprijinul îmbunătățirii estimării impactului incendiilor de pădure.
- Testarea și validarea surprinderii, pe baza datelor furnizate de senzorii satelitari cu mare rezoluție temporală (MODIS și VIIRS) și furnizate de EFFIS, a punctelor de inițiere a incendiilor sau focarele de incendii de pădure analizate în zona de cercetare din județul Mehedinți, demonstrându-se utilitatea acestor sisteme bazate pe tehnici ale teledetecției pentru semnalizarea incendiilor, către echipele de intervenție, în zonele nepopulate unde incendiile neidentificate la timp se pot extinde într-un mod alarmant.
- Particularizarea aplicării unei metode de estimare a severității incendiilor asupra arboretelor de salcâm, bazată pe utilizarea indicelui diferențial normalizat al arderii obținut din imagini satelitare optice Sentinel 2, evidențiindu-se faptul că pragurile de severitate trebuie ajustate ținându-se cont de densitatea arboretelor și de înălțimea arborilor componenți.

7. DISEMINAREA REZULTATELOR

A. Lucrări din domeniul tezei de doctorat, publicate în reviste indexate ISI

1. Capalb, F., Apostol, B., **Lorent, A.**, Petrila, M., Marcu, C., & Badea, N.O. (2024). Integration of Terrestrial Laser Scanning and field measurements data for tree stem volume estimation: exploring parametric and non-parametric modeling approaches. *Annals of Forest Research, Res.* 67(1) (autor corespondent) <https://www.afrjournal.org/index.php/afr/article/view/3664/1286>
2. Mallinis, G., Petrila, M., Mitsopoulos, I., **Lorent, A.**, Neagu, Ş., Apostol, B., Gancz, V., Popa, I., Goldammer, J. G. (2019). Geospatial Patterns and Drivers of Forest Fire Occurrence in Romania. *Applied Spatial Analysis and Policy*, 12, 773-795, DOI : 10.1007/s12061-018-9269-3, WOS:000501905800002. <https://doi.org/10.1007/s12061-018-9269-3>

B. Lucrări din domeniul tezei de doctorat, publicate în reviste BDI

1. **Lorent, A.**, Petrila, M., Capalb, F., Apostol, B., Marcu, C., & Badea, N.O. (2024). Overview of the Forest Fires Defense System in Romania. *Environmental Protection and Disaster Risks (EnviroRisks 2024)* - Proceeding of the 3rd International Conference on Environmental protection and disaster risks and 11th Annual CMDR COE conference on Crisis management and disaster response. edited by: Nina Dobrinkova, Stefka Fidanova, Springer Nature Switzerland – în curs de publicare
2. **Lorent, A.**, Gancz, V., Petrila, M., Apostol, B., Capalb, F., Marcu, C., & Badea, N.O. (2023). Detectarea și localizarea incendiilor de pădure și urmărirea evoluției acestora pe baza imaginilor satelitare de înaltă rezoluție temporală. [*Detection and localization of forest fires and tracking their evolution based on high temporal resolution satellite images*]. *Revista de Silvicultură și Cinegetică*, nr 52, 2023, pp. 63-69, ISSN 1583 – 2112, ISSN 2284 – 7936 (on line). http://progresulsilvic.ro/wp-content/uploads/Revista-de-Silvicultura-si-Cinegetica-nr.-52_2023-.pdf
3. **Lorent, A.**, Petrila, M., Gancz, V., Capalb, F., Apostol, B., & Badea, N.O. (2022). Quick assessment of burn area and burn severity on black locust stands using Sentinel 2 imagery in South-West Romania. In D. X. Viegas & L. M. Ribeiro (Ed.), *Advances in Forest Fire Research*, pp. 1282–1291. University of Coimbra. https://doi.org/10.14195/978-989-26-2298-9_194
4. **Lorent, A.**, Neagu, Ş, Petrila, M., Apostol, B., Gancz, V., Mitsopoulos, I., & Mallinis, G. (2018). Evaluarea hazardului la incendii de pădure la nivel de unitate administrativ-teritorială în perioada 2006–2015. [*Forest fire hazard assessment at territorial administrative unit level during 2006-2015 period*]. *Revista Pădurilor*, 133(4), 37–58. http://revistapadurilor.com/wp-content/uploads/2018/11/Revista-Padurilor-nr.-4_2018.pdf

C. Lucrări în afara domeniului tezei de doctorat, publicate în reviste indexate ISI

1. Chivulescu S., Hapa M., Pitar D., **Lorent, A.**, Marmureanu L., Leca S., Radu R., Cazacu R., Dobre A.C., Pascu I.S., Marcu C., Vergehet M., Vezeanu C., Racoviceanu T. & Badea O. (2024). Integrating monetary and non-monetary valuation for ecosystem services in Piatra Craiului



- national park, Southern Carpathians: a comprehensive approach to sustainability and conservation. *Front. For. Glob. Change* 7:1280793. DOI: 10.3389/ffgc.2024.1280793, WOS:001184279300001. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2024.1280793>
2. Ciuvăţ, A.L., Abrudan, I.V., Ciuvăţ, C.G., Marcu, C., **Lorent, A.**, Dincă, L. Szilard, B. (2022). Black Locust (*Robinia pseudoacacia* L.) in Romanian Forestry. *Diversity*, 14, 780, DOI: 10.3390/d14100780, WOS:000874343200001. <https://doi.org/10.3390/d14100780>
 3. Apostol B., Petrila M., **Lorent, A.**, Ciceu A., Gancz V. & Badea, O. (2020). Species discrimination and individual tree detection for predicting main dendrometric characteristics in mixed temperate forests by use of airborne laser scanning and ultra-high-resolution imagery *Sci. Total Environ.*, 698 (2020), Article 134074, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134074, WOS:000500580700013. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969719340513>
 4. Apostol, B., Chivulescu, S., Ciceu, A., Petrila, M., Pascu, I., Apostol, E., Leca, ., **Lorent, A.**, Tănase, M., Badea, O. (2018). Data collection methods for forest inventory: a comparison between an integrated conventional equipment and terrestrial laser scanning. *Annals of Forest Research* 61(2), p. 189-202, DOI:10.15287/afr.2018.1189, WOS:000456193900006, <https://afrjournal.org/index.php/afr/article/view/1189>
- D. Lucrări în afara domeniului tezei de doctorat, publicate reviste BDI
1. Capalb F., Petrila M., **Lorent, A.**, Apostol B., Marcu C., Badea O. (2023). Estimarea volumului la arbori individuali pe baza norilor de puncte obţinuţi prin scanare cu laser terestru (TLS) – studiu de caz pentru arborete de molid din vestul Carpaţilor Meridionali. [*Estimating volume for individual trees based on point clouds obtained through terrestrial laser scanning (TLS) – a case study for spruce stands in the western part of Southern Carpathians*]. *Revista de Silvicultură şi Cinegetică*, anul XXVIII, nr. 53, p. 12-18 <http://progresulsilvic.ro/a-aparut-numarul-52-al-revistei-de-silvicultura-si-cinegetica-il-puteti-descarca-in-format-pdf-2>
 2. Capalb F., Apostol B., Chivulescu Ş., Petrila M., Marcu C., **Lorent, A.**, Badea O. (2022). Determinarea înălţimii arborilor prin intermediul unui model nelinear de predicţie, pentru arborete de molid din vestul Carpaţilor Meridionali. [*Tree height determination using a non-linear predicting model, for Norway spruce stands in the western part of Southern Carpathians*]. *Revista de Silvicultură şi Cinegetică*, anul XXVII, nr. 51, p. 56-61. http://progresulsilvic.ro/wp-content/uploads/RCS_47_2020.pdf
 3. Apostol, B., Capalb, F., **Lorent, A.**, Petrila, M., Chivulescu, Ş., Marcu, C., Farcaş, S., Gancz, V. (2021). Estimarea compoziţiei arboretelor prin identificarea grupelor principale de specii forestiere utilizând imagini satelitare Sentinel 2 – un studiu de caz [*Use of Sentinel 2 satellite imagery for the identification of main groups of forest species - a case study*]. *Revista de Silvicultură şi Cinegetică*, anul XXVI, nr. 48: 48-57 <http://progresulsilvic.ro/wp-content/uploads/2021.48-WEB.pdf>
 4. Cazacu, R., Baci, G., Chivulescu, Şerban, Pitar, D., Dobre, A. C., Apostol, B., Vergheleş M., Leca Ş., Duro J.G., **Lorent, A.**, Vezeanu C., Ciceu A., Pascu I.S., Marcu C., Angheluş C., Ban I., Loghin C., Bordea I., Kurta A., Apostol E., Badea, O. (2020). Identifying and selecting methods for ecosystem services valuation - A case study in Piatra Craiului National Park. *Revista de*



Silvicultură și Cinegetică, (47), 49-55. http://progresulsilvic.ro/wp-content/uploads/RCS_47_2020.pdf

5. Ivan R., Pleşca IM, **Lorentz A.**, Baciuc EG, Pleşca B., Apostol EN, Achim Gh., Budeanu M. (2020). Premise pentru înființarea unui plantaj de stejar pufos. [*Premises for the establishment of a pubescent oak seed orchard*]. Revista de Silvicultură și Cinegetică, (47), 49-55. http://progresulsilvic.ro/wp-content/uploads/RCS_47_2020.pdf
 6. Aponte, C., Zamfira, V., Pitar, D., Dobre, A.C., Pascu, I.S., Leca, Ș., Ciceu, A., Garcia Duro, J., Apostol, B., Chivulescu, Ș., Pitar, D., Petrila, M., **Lorentz A.**, Guiman, G., Popescu, F., Badea, O. (2020). Evaluarea posibilității de implementare a unui sistem național de monitorizare a pădurilor bazat pe tehnologii de Observare a Terrei (Assessing the possibility of implementing a national forest monitoring system based on Earth Observation Technologies). Revista de Silvicultură și Cinegetică, anul XXV, nr. 47: 44-48. http://progresulsilvic.ro/wp-content/uploads/RCS_47_2020.pdf
 7. Apostol, B., **Lorentz A.**, Apostol, E.N., Petrila, M., Gancz, V. (2018). Identificarea principalelor grupe de specii forestiere utilizând date LiDAR aeropurtat și imagini aeriene multispectrale înregistrate de avioane fără pilot [*Identification of the main groups trees species using airborne LiDAR data and multispectral aerial images recorded by unmanned airplanes*]. Revista de Silvicultură și Cinegetică. Anul XXIII Nr. 42, p. 35-43 http://progresulsilvic.ro/wp-content/uploads/RSC_42_2018.pdf
- E. Participări la Conferințe internaționale
1. **Lorentz A.**, Petrila, M., Capalb, F., Apostol, B., Marcu, C., & Badea, N.O., 2024. Overview of the Forest Fires Defense System in Romania. Environmental Protection and Disaster Risks (EnviroRisks 2024). The 3rd International Conference on Environmental protection and disaster risks and 11th Annual CMDR COE conference on Crisis management and disaster response, 04 June – 06 June 2024, Sofia, Bulgaria
 2. Capalb, F., Petrila, M., **Lorentz A.**, Apostol, B., Marcu, C, Badea, O., 2023. Experimenting an improved tree point cloud segmentation method of TLS data in a spruce forest inventory network. Forest science for people and societal challenges - The 90th "Marin Drăcea" INCDS Anniversary, 2-5 October 2023, Bucharest, Romania
 3. Capalb, F., Petrila, M., **Lorentz A.**, Apostol, B., Marcu, C., Badea, O., 2023. Predicting Tree Crown Width of Individual Trees In The Western Southern Carpathians Using Terrestrial Laser Scanning And Random Forest Algorithm. Forest science for people and societal challenges - The 90th "Marin Drăcea" INCDS Anniversary, 2-5 October 2023, Bucharest, Romania
 4. **Lorentz A.**, Petrila M., Apostol B., Capalb F., Marcu C., Badea O., 2023. Identification Of The Driving Factors For The Occurrence Of Forest Fires And The Zoning Of Forest Fire Hazard Through Logistic Regression And Random Forest In Romania, 42nd EARSeL Symposium, Bucharest, Romania, 3-6 of July 2023
 5. Apostol B., **Lorentz A.**, Chivulescu Ș., Ciceu A., Petrila M., Capalb F., Marcu C., Badea O., 2022. Integration of Terrestrial Laser Scanning (TLS) and Airborne Laser Scanning (ALS)



Processed Data for the Assessment of Norway Spruce Dendrometric Characteristics – a Case Study, 41st EARSeL Symposium, Paphos, Cyprus, 13-16 September 2022

6. Apostol B., Petrila M., Duro J.G., **Lorentz A.**, Capalb F., Marcu C., Farcaş S., 2022. Integration of Canopy Height Models Derived from Airborne LiDAR Data and UAV Aerial Imagery by DTM-DSM Matching in the Forest Free Areas, 41st EARSeL Symposium, Paphos, Cyprus, 13-16 September 2022
 7. **Lorentz A.**, Gancz V., Petrila M., Capalb F., Apostol B., Soare I., 2022. A web GIS mapping service for a better exploitation of the forest melliferous resources in South East Romania, 41st EARSeL Symposium, Paphos, Cyprus, 13-16 September 2022
 8. Apostol B., Pascu I. S., Petrila M., Dobre A.C., **Lorentz A.**, Gancz V., Badea O., 2019. "A comparative assessment of the area-based approach and individual tree detection for volume estimation in mixed temperate forests using Airborne Laser Scanning data", SilviLaser Conference 2019, 16th edition, Foz do Iguazu, Brasil, 8-10th October 2019
- F. Participări la Conferințe naționale
1. **Lorentz A.**, Petrila M., Neagu, Ș., Apostol B., Gancz V., 2019. "Utilizarea datelor geospațiale silvice ca suport informațional pentru managementul incendiilor de pădure", Conferința Națională de Medicină de Urgență și Salvări în Situații Speciale, SARTISS, Băile Felix, Romania, 6-9th November 2019

LISTA DE TABELE

Tabelul 3.1. Criterii de estimare a severităţii incendiilor pe teren	14
Tabelul 3.2. Indici spectrali utilizaţi pentru evaluarea efectelor incendiilor forestiere (adaptare după Mallinis et al., 2017).....	16
Tabelul 3.3. Indici spectrali bitemporali utilizaţi pentru evaluarea efectelor incendiilor forestiere (adaptare după Mallinis et al, 2017)	16
Tabelul 3.4. Nivele de severitate bazate pe indicele dNBR (adaptare după USGS).....	17
Tabelul 3.5. Cheie de corectare a severităţii estimate din imagini satelitare/aeriene	18
Tabelul 3.6. Centralizarea incendiilor de pădure înregistrate în trupurile de pădure Jiana şi Pătulele în perioada 04-14.08.2021 (conform rapoartele de incendiu redactate de către ocoalele silvice şi centralizatorul sintetic al incendiilor din 2021 furnizat de MMAP)	19
Tabelul 4.1. Tipurile de combustibili de vegetaţie selectate pentru realizarea hărţii distribuţiei tipurilor de combustibili la nivel naţional	22
Tabelul 4.2. Indicii de combustibilitate la nivel de tip de ecosistem pentru pădurile din România.....	24
Tabelul 4.3. Repartiţia lunară a incendiilor de pădure în perioada 2006-2018.....	28
Tabelul 4.4. Centralizator cu variabilele predictive utilizate în cadrul analizelor statistice	31
Tabelul 4.5. Variabilele luate în considerare în modelul regresiei logistice	37

LISTA DE FIGURI

Figura 3.1. Localizarea cercetărilor: a) teritoriul României – pentru cartarea combustibililor vegetali și analiza de hazard și b) o zonă împădurită din raza comunelor Jiana și Pătulele din județul Mehedinți	8
Figura 3.2. Imagini Sentinel 2 din zona de studiu: 2021-08-01 (a) înainte de evenimentele de incendiu, 2021-08-11 (b) după evenimentele de incendiu. Comparația de culori: RGB = B8, B3, B2. Linie galbenă - limitele pădurii (trupul de pădure Jiana, județul Mehedinți).....	13
Figura 3.3 Amplasamentul suprafețelor de probă pentru estimarea severității incendiilor în teren	14
Figura 3.4. Modelul de prelucrare preliminară automată a imaginilor Sentinel 2 (MSI) în sistemul ArcGIS....	15
Figura 4.1. Harta tipurilor de combustibili de suprafață (litieră) pentru ecosistemele forestiere din România	21
Figura 4.2. Harta distribuției densității vegetației forestiere la nivelul României obținută pe baza datelor MOD44B (stratul <i>percent tree cover</i>)	21
Figura 4.3. Harta distribuției tipurilor de combustibili vegetali la nivel național	23
Figura 4.4. Harta indicilor de combustibilitate pentru ecosistemele forestiere din România.....	26
Figura 4.5. Harta incendiilor de pădure înregistrate în perioada anilor 2006-2023	27
Figura 4.6. Distribuția anuală a numărului de incendii de pădure (verde) și a suprafețelor afectate (albastru) în perioada anilor 2006-2018	27
Figura 4.7. Intensitatea densității de probabilitate obținută prin modelul kernel pe baza punctelor de incendii de pădure localizate la nivel național	28
Figura 4.8. Distribuția indicelui topografic de cuantificare a radiației solare – TRASP, pentru teritoriul României.....	30
Figura 4.9. Distribuția acoperirii/utilizării terenului pentru România (Corine Land Cover 2018)	30
Figura 4.10. Ierarhizarea variabilelor predictive, după importanță în modelul Random Forest	33
Figura 4.11. Diagrama variabile precise vs. variabile observate în modelul Random Forest	34
Figura 4.12. Harta de hazard la incendii de pădure obținută pe baza modelului Random Forest	35
Figura 4.13. Ponderea incendiilor detectate de senzorul VIIRS pe clasele de hazard delimitate prin modelul Random Forest	36
Figura 4.14. Harta privind hazardul la incendii de pădure după metoda regresiei logistice	39
Figura 4.15. Ponderea incendiilor detectate de senzorul VIIRS pe clasele de hazard delimitate prin metoda regresiei logistice.....	40
Figura 4.16. Comparația între imaginile Sentinel 2 originale pentru trupul de pădure Jiana din județul Mehedinți (A1 - 01.08.2021; B1 – 11.08.2021) , Infraroșu color (RGB 8-4-3), NDVI (felieri de densitate), (A - 01.08.2021; B2 – 11.08.2021) și NBR) (A3 - 01.08.2021; B3 – 11.08.2021). Cu linii galbene, respectiv negre sunt marcate limitele fondului forestier.	43
Figura 4.17. Comparația între indicii NBR (A) și dNBR (B) (felieri de densitate) a imaginii Sentinel 2 din data de 11.08.2021 (vezi figura 5 A2). Cu linii negre sunt marcate limitele fondului forestier (trupul de pădure Jiana din județul Mehedinți)	44

Figura 4.18. Comparația între imaginile indicilor A-NBRn, B-Clre, C-NDVI, D-GNDVI, E-NDVlre1, F-NDVlre1n, G-MSRre1, H-MSRre1n la data de 11.08.2021. Liniile de culoare neagră delimitează fondul forestier (trupul de pădure Jiana din județul Mehedinți).	45
Figura 4.19. Indicele dNBR obținut din imagini Sentinel 2 la data de 2021-08-01 (ante-incendii), 2021-08-11 (post-incendii). Linia galbenă marchează limitele pădurii (trupul de pădure Jiana din județul Mehedinți)..	46
Figura 4.20. Noua hartă de severitate corectată pe baza indicelui de acoperire a coroanelor și înălțimea arborilor. Linie neagră marchează limitele pădurii (trupul de pădure Jiana din județul Mehedinți).	47
Figura 4.21. Imagine Sentinel 2, trupul de pădure Pătulele, județul Mehedinți. Situația la data 6 august, 2021 în care se prezintă punctele semnalizate de senzorul MODIS.	48
Figura 4.22. Imagine Sentinel 2, trupul de pădure Pătulele, județul Mehedinți. Situația la data de 9 august 2021 în care sunt prezentate punctele semnalizate de senzorul MODIS	49
Figura 4.23. Imagine Sentinel 2, trupul de pădure Pătulele, județul Mehedinți. Situația la data 11 august 2021 în care sunt prezentate punctele semnalizate de senzorul MODIS.	50
Figura 4.24. Trupul de pădure Pătulele – detaliu. A) Imagine Sentinel 2, 06.08.2021: nu a apărut vreun focar de incendiu; B) Imagine PlanetScope Dove, 09.08.2021 ora 8:30 GMT: suprafață agricolă arsă, incendiu în curs s-a propagat și în suprafața de pădure din sud; C) Imagine Sentinel 2 (09.08.2021 ora 9:30 GMT): incendiu în curs, atât pe suprafața agricolă cât și în pădure; se observă și foc deschis; D) Imagine Sentinel 2, 11.08.2021: efectul incendiului.....	51

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

- Adam I., 2006. Asistență tehnică privind elaborarea riscului de incendiu pentru pădurile României. Raport științific (manuscris). Institutul de Cercetări și Amenajări Silvice (ICAS), 80 p.
- Adam, I. (2007). Metodă de evaluare a riscului de incendiu în pădurile României, *Analele ICAS*, 50, pp. 261-271.
- Amatulli, G., Rodrigues, M. J., Trombetti, M., & Lovreglio, R. (2006). Assessing long-term fire risk at local scale by means of decision tree technique. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 111(4), 1–15. <http://doi.org/10.1029/2005JG000133>
- Arca, B., et al. (2012). Potential changes in fire probability and severity under climate change scenarios in Mediterranean areas. In: D. Spano, V. Bacchi, M. Salis, and C. Sirca, eds. *Modelling fire behaviour and risk*. Muros, Italy: Nuova Stampa Color, 92-98.
- Archibald, S., Roy, D. P., van Wilgen, B. W., & Scholes, R. J. (2009). What limits fire? An examination of drivers of burnt area in Southern Africa. *Global Change Biology*, 15(3), 613–630. <http://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01754.x>
- Armenteras D, Gibbes C, Vivacqua C, Espinosa J, Duleba W, Goncalves F, et al. (2016). Interactions between Climate, Land Use and Vegetation Fire Occurrences in El Salvador. *Atmosphere*;7(2):26.
- Banu TP, Banu C, Banu CA. (2014). GIS-based assessment of fire risk in National Park Domogled-Cerna Valley. *J Horticult For Biotechnol*;18:52-6
- Barbu, I., (2008). Modelarea și prognoza riscului de apariție a secetei și incendiilor în ecosistemele forestiere din România, Raport științific (manuscris), Institutul de Cercetări și Amenajări Silvice (ICAS), p. 91.
- Barrows, J. *Fire Behavior in the Northern Rocky Mountain Forests*; 29; USDA, Forest Service, Northern Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station: Ogden, UT, USA, 1951.
- Basheer A., Hajmeer M., *Artificial neural networks: fundamentals, computing, design, and application*, *Journal of Microbiological Methods*, 43 (2000), 3 - 31.
- Belgiu, M., & Drăguț, L. (2016). Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 114, 24–31. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011>
- Burlui, I. (2013). "Managementul riscului de incendiu la păduri". Teză de doctorat. Universitatea Ștefan cel Mare din Suceava, p.160
- Castro R, Chuvieco E. (1998). Modeling forest fire danger from geographic information systems. *Geocarto International*, 13(1):15-23
- Catry FX, Rego FC, Bação FL, Moreira F. (2009). Modelling and mapping wildfire ignition risk in Portugal. *International Journal of Wildland Fire*, 18(8):921–31.
- Chuvieco E, Aguado I, Yebra M, Nieto H, Salas J, Martin MP, et al. 2010. Development of a framework for fire risk assessment using remote sensing and geographic information system technologies. *Ecological Modeling*: 221: 46–58.

- Corine Land Cover (CLC) 2018, Version 2020_20u1. Available online: <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-landcover/clc2018>, <https://doi.org/10.2909/71c95a07-e296-44fc-b22b-415f42acfd0> (accesat la 30 Februarie 2023).
- Costafreda-Aumedes, S., Comas, C., & Vega-Garcia, C. (2017). Human-caused fire occurrence modelling in perspective: A review. *International Journal of Wildland Fire*, 26(12), 983–998. <http://doi.org/10.1071/WF17026>
- Cutler, D.R., Edwards, T.C., Beard, K.H., Cutler, A., Hess, K.T., Gibson, J., Lawler, J.J., 2007. Random forests for classification in Ecology. *Ecology* 88 (11), 2783–2792
- Dimitrakopoulos A.P. (2002). Mediterranean fuel models and potential fire behaviour in Greece. *International Journal of Wildland Fire*, 2002, 11, 127–130
- Dlamini, W. (2011). Application of Bayesian networks for fire risk mapping using GIS and remote sensing data. *GeoJournal* 76: 283–296.
- Doniță, N., Bândiu, C., Biriș, I-A, Gancz, V., Apostol, J., Marcu, C., 2008, Harta pădurilor – pe unități ecosistemice. România (scara 1:500 000). Editura Silvică, București.
- Elith, J., Graham, C. H., Anderson, R. P., Dudik, M., Ferrier, S., Guisan, A., ... Zimmermann, N. E. (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29(2), 129–151. <http://doi.org/10.1111/j.2006.0906-7590.04596.x>
- Fiedler, C., Keegan, C., Woodall, C., Morgan, T., Robertson, S., Chmelik, J. (2001). A strategic assessment of fire hazard in Montana. Joint Fire Sciences Program, University of Montana, Missoula, Methods.
- Fotheringham, A., Brunson, C., Charlton, M. (2002). *Geographically Weighted Regression: the Analysis of Spatially Varying Relationship*. Wiley: New York.
- Franklin, J. (2010). *Mapping Species Distributions*. Cambridge University Press: New York
- FUELMAP project, [Final Classification and Mapping of EU Fuel Complexes,] Deliverable 2. JRC-ITT/RFQ Reference 2008/S 116-153998 (2011).
- Ganteaume, A., & Jappiot, M. (2013). What causes large fires in Southern France. *Forest Ecology and Management*, 294, 76–85. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.06.055>
- Ganteaume, A., Camia, A., Jappiot, M., San-Miguel-Ayanz, J., Long-Fournel, M., & Lampin, C. (2013). A review of the main driving factors of forest fire ignition over Europe. *Environmental Management*. <http://doi.org/10.1007/s00267-012-9961-z>
- Gislason, P.O., Benediktsson, J.A., Sveinsson, J.R. (2006). Random forests for land cover classification. *Pattern Recogn. Lett.* 27, 294–300.
- González DC, Rios RC. (2009). Fire Danger, Fire Detection, Quantification of Burned Areas and Description of Post-Fire Vegetation in the Central Area of Chile. In: Chuvieco E, editor. *Earth Observation of Wildland Fires in Mediterranean Ecosystems*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, p. 55–70.
- Gonzalez, J., Kolehmainen, O., Pukkala. T. (2007). Using expert knowledge to model forest stand vulnerability to fire. *Computers and Electronics in Agriculture* 55:107–114.

- Guo, F., Innes, J. L., Wang, G., Ma, X., Sun, L., Hu, H., & Su, Z. (2015). Historic distribution and driving factors of human-caused fires in the Chinese boreal forest between 1972 and 2005. *Journal of Plant Ecology*, 8(5), 480–490. <http://doi.org/10.1093/jpe/rtu041>
- Heikkilä V.T., Gronqvist R., Jurvellus M. (2010), *Wildland Fire Management. Handbook for Trainers*. FAO, Forest Management Team – Forestry Department, 250 p
- Hessburg PF, Reynolds KM, Keane RE, James KM, Salter RB (2007) Evaluating wildland fire danger and prioritizing vegetation and fuels treatments. *For Ecol Manage* 247:1–17
- Inspectoratul General pentru Situații de Urgență, Comitetul Național pentru Situații de Urgență 2020. Planul Național de Management la Dezastre. https://www.igsu.ro/Resources/COJ/RapoarteStudii/PLANUL%20NA%C8%9AIONAL%20DE%20MANAGEMENT%20AL%20RISCURILOR%20DE%20DEZASTRE%20clear%2001_03_2021%20redus.pdf (ultima accesare 12 martie 2024).
- Jurdao, S., Chuvieco, E., Arevalillo, J. M. 2012. Modelling fire ignition probability from satellite estimates of live fuel moisture content. *The Journal of the Association for Fire Ecology* 8: 77–97
- Keane RE, Drury SA, Karau EC, Hessburg PF, Reynolds KM (2010) A method for mapping fire hazard and risk across multiple scales and its application in fire management. *Ecol Model* 221:2–18
- Keane, R.E., Menakis, J.P., Hessburg, P.F., Reynolds, K.M., Dickinson, J.D. (2014). Evaluating Wildfire Hazard and Risk for Fire Management Applications. In: Reynolds, K., Hessburg, P., Bourgeron, P. (eds) *Making Transparent Environmental Management Decisions*. Environmental Science and Engineering(). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-32000-2_6
- Kelly, L.; Brotons, L. (2017). Using fire to promote biodiversity. *Science*, 355, 1264–1265.
- Key, C.H, Benson, N.C. (2006). Landscape assessment: Remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio. FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System. *General Technical Report*, RMRS-GTR-164-CD, 305–325.
- Klaver, J. Klaver, R., Burgan, R. (1998). Using GIS to assess forest fire hazard in the Mediterranean region of the United States. In: Laverty, L., and J. Williams. 2000. *Protecting people and sustaining resources in fire-adapted ecosystems – A cohesive strategy*. Forest Service response to GAO Report GAO/RCED 99-65 USDA Forest Service, Washington DC.
- Koutsias, N., Chuvieco, E., Allgöwer, B., Martínez, J. (2005). Modelling wildland fire occurrence in Southern Europe by geographically weighted regression approach. In: de la Riva, J., Chuvieco, E.P. (Eds.), *5th International Workshop on Remote Sensing and GIS Applications to Forest Fire Management: Fire effects assessment*. Zaragoza, Universidad de Zaragoza-EARSeL, pp. 57–60.
- Koutsias, N., Karteris, M., Balatsos, P., Kalabokidis, K.D. (2005). Strategic planning approach in wildland fire danger zoning: a geographical perspective with historical fire observations. *Geographies* 10: 62–79.
- Koutsias, N., Martinez-Fernandez, J., Allgower, B. (2010). Do factors causing wildfires vary in space? Evidence from geographically weighted regression. *GIScience and Remote Sensing* 47: 1548–1603.
- Kovats, R. S., Valentini, R., Bouwer, L.M., Georgopoulou, E., Jacob, D., Martin, E., et al. (2014). Europe. In V. R. Barros, C. B. Field, D. J. Dokken, M. D. Mastrandrea, K. J. Mach, T. E. Bilir, et al. (Eds.), *Climate*

- change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part B: Regional aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change (pp. 1267– 1326). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Lawrence, R.L., Wood, S.D., Sheley, R.L. (2006). Mapping invasive plants using hyperspectral imagery and Breiman Cutler classifications (randomForest). *Remote Sens. Environ.* 100, 356–362.
- Lewis, S.L.; Edwards, D.P.; Galbraith, D. (2015). Increasing human dominance of tropical forests. *Science*, 349, 827–832.
- Lizundia-Loiola, J.; Otón, G.; Ramo, R.; Chuvieco, E. (2020). A spatio-temporal active-fire clustering approach for global burned area mapping at 250 m from MODIS data. *Remote Sens. Environ.*, 236, 111493.
- Loboda T V. (2009). Modeling fire danger in data-poor regions: A case study from the Russian Far East. *International Journal of Wildland Fire.*;18(1):19-35
- Lorenț, A., Neagu, Ș., Petrila, M., Apostol, B., Gancz, V., Mitsopoulos, I., Mallinis, G. (2018). Evaluarea hazardului la incendii de pădure la nivel de unitate administrativ-teritorială în perioada 2006-2015. *Revista Pădurilor* nr. 4/2018, ISSN print 1583-7890, ISSN online: 2067-196. p. 37-58
- Lung, T., et al. 2012. A multi-hazard regional level impact assessment for Europe combining indicators of climatic and non-climatic change. *Global Environmental Change*: 23, 522–536
- Lutes, Duncan C.; Keane, Robert E.; Caratti, John F.; Key, Carl H.; Benson, Nathan C.; Sutherland, Steve; Gangi, Larry J. 2006. FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 1 CD.
- Mallinis G., Mitsopoulos I., Chrysafi I. (2017). Evaluating and comparing Sentinel 2A and Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) spectral indices for estimating fire severity in a Mediterranean pine ecosystem of Greece. *GIScience & Remote Sensing*, Volume 55, 2018 - Issue 1
- Mallinis, G., Petrila, M., Mitsopoulos, I., Lorenț, A., Neagu, Ș., Apostol, B., Gancz, V., Popa, I., Goldammer, J. G. (2019). Geospatial Patterns and Drivers of Forest Fire Occurrence in Romania. *Applied Spatial Analysis and Policy*, 12, 773-795, <https://doi.org/10.1007/s12061-018-9269-3>
- Massada, A. B., Syphard, A., Stewart, S. I., & Radeloff, V. C. (2012). Wildfire ignition-distribution modelling : a comparative study in the Huron – Manistee National Forest , Michigan USA. *International Journal of Wildland Fire*, 174–183.
- Merrill, D.F., Alexander, M.E. (1987). *Glossary of Forest Fire Management Terms*, fourth edn. National Research Council of Canada, Canadian Committee on Forest Fire Management, Ottawa, Ontario.
- Mihai, BA., Săvulescu, I., Vîrghileanu, M., Olariu, B. (2019). Evaluation of Sentinel-2 MSI and Pleiades 1B Imagery in Forest Fire Susceptibility Assessment in Temperate Regions of Central and Eastern Europe. A Case Study of Romania. In: Pourghasemi, H., Rossi, M. (eds) *Natural Hazards GIS-Based Spatial Modeling Using Data Mining Techniques*. *Advances in Natural and Technological Hazards Research*, vol 48. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73383-8_11

- Mitsopoulos, I., Mallinis, G., Zibtsev, S., Yavuz, M., Saglam, B., Kucuk, O., Bogomolov, V., Borsuk, A., Zaines, G. (2016). An integrated approach for mapping fire suppression difficulty in three different ecosystems of Eastern Europe. *Journal of Spatial Science* DOI: 10.1080/14498596.2016.1169952
- Mundo, I. A., Wiegand, T., Kanagaraj, R., & Kitzberger, T. (2013). Environmental drivers and spatial dependency in wildfire ignition patterns of northwestern Patagonia. *Journal of Environmental Management*, 123, 77–87, doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.03.011
- Nunes, A. N., Lourenço, L., & Meira, A. C. C. (2016). Exploring spatial patterns and drivers of forest fires in Portugal (1980–2014). *Science of the Total Environment*, 573, 1190–1202. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.121>
- Oliveira S, Oehler F, San-Miguel-Ayanz J, Camia A, Pereira JMC. (2012). Modeling spatial patterns of fire occurrence in Mediterranean Europe using Multiple Regression and Random Forest. *Forest Ecology and Management*, 275:117–29
- Oliveira, S., Pereira, J. M. C., San-Miguel-Ayanz, J., & Lourenço, L. (2014). Exploring the spatial patterns of fire density in Southern Europe using Geographically Weighted Regression. *Applied Geography*, 51, 143–157. <http://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.04.002>
- Pan, J, Wang, W., Li, J. (2016). Building probabilistic models of fire occurrence and fire risk zoning using logistic regression in Shanxi Province, China. *Natural Hazards* 81: 1879–1899
- Petrila, M., Lorent, A., Neagu, S., Apostol, B., Gancz, V., Popa, I., Mallinis, G., Ioannis Mitsopoulos, I., Goldammer, J. (2016). Evaluarea Riscurilor de Dezastre la Nivel Național RO-RISK - Raport consolidat pentru riscul de incendii de pădure. Raport științific. INCDS “Marin Drăcea”, p. 210
- Posea, I.V.M., 2012, Managementul riscului la incendii forestiere, Teză de doctorat, Universitatea Transilvania din Braşov, p.198
- Rodrigues, M., de la Riva, J., Fotheringham, S., (2014). Modeling the spatial variation of the explanatory factors of human-caused wildfires in Spain using geographically weighted logistic regression. *Applied Geography*, 48, 52–63. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.01.011>.
- Sá, A., Pereira, J., Charlton, M., Mota, B., Barbosa P., Fotheringham, A. 2011. The pyrogeography of sub-Saharan Africa: a study of the spatial non-stationarity of fire environment relationships using GWR, *Journal of Geographical Systems* 13: 227–248
- Safi Y., Bouroumi A., A neural network approach for predicting forest fires, 2011 International Conference on Multimedia Computing and Systems, Ouarzazate, 2011, pp. 1-5
- Sandberg D.V., Ottmar R.D., Cushon G.H. (2001) Characterizing fuels in the 21st Century. *International Journal of Wildland Fire* 10, 381–387
- San-Miguel-Ayanz J., Durrant T., Boca R., Maianti P., Liberta` G., Oom D., Branco A., De Rigo D., Ferrari D., Roglia E. and Scionti N. *Advance Report on Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa 2022*, EUR 31479 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2023, ISBN 978-92-68-02143-9, doi:10.2760/091540, JRC133215
- Satir, O., Berberoglu, S., Donmez, C. (2015). Mapping regional forest fire probability using artificial neural network model in a Mediterranean forest ecosystem. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. DOI:10.1080/19475705.2015.1084541

- Scott, Joe H.; Burgan, Robert E. (2005). Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model. General Technical Report RMRS-GTR-153. Fort Collins, CO: USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 72 p.
- Syphard AD, Radeloff VC, Keuler NS, Taylor RS, Hawbaker TJ, Stewart SI, et al. (2008). Predicting spatial patterns of fire on a southern California landscape. *International Journal of Wildland Fire*, 17(5):602–13.
- Tănase, M. A., & Gitas, I. Z. (2008). An examination of the effects of spatial resolution and image analysis technique on indirect fuel mapping. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 1(4), 220–229. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2009.2012475>
- Toukiloglou, P., Eftychidis, G., Gitas, I., & Tompoulidou, M. (2013). ArcFuel methodology for mapping forest fuels in Europe. First International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2013), 8795, 87951J. <https://doi.org/10.1117/12.2028213>
- Turner D, Lewis M, Ostendorf B. (2011). Spatial indicators of fire risk in the arid and semi-arid zone of Australia. *Ecological Indicators*, 11(1):149–67.
- Vadrevu, K., Eaturu A., Badarinath K. (2010). Fire risk evaluation using multicriteria analysis – a case study. *Environmental Monitoring and Assessment* 166: 223–239.
- Won, M. S., Koo, K. S., Lee, M. B. and Lee, S. Y., “Fuel Type Classification and Fuel Loading in Central Interior, Korea: Uiseong-Gun,” *USDA Forest Service Proceedings RMRS*,41 (2006).
- Yool, S., Eckhardt, D., Estes, J., Cosentino, M. (1985). Describing the brushfire hazard in Southern California. *Annual Association of American Geography* 75: 417–430.
- Zumbrunnen T, Pezzatti GB, Menéndez P, Bugmann H, Bürgi M, Conedera M. (2011). Weather and human impacts on forest fires: 100 years of fire history in two climatic regions of Switzerland. *Forest Ecology and Management*, 261(12):2188–99.

SCURT REZUMAT

Pădurile și ecosistemele forestiere sunt de o importanță deosebită pentru viabilitatea și dezvoltarea socială, economică și de mediu. Acestea joacă roluri semnificative în comunitățile rurale și urbane, oferind bunuri și servicii și complexe și protejând biodiversitatea.

Schimbările sociale și economice majore în utilizarea terenurilor în țara noastră determinate de mișcările populației din zonele rurale spre cele urbane, abandonarea utilizării tradiționale a terenurilor în mediile rurale, reducerea utilizării pădurilor pentru producția de materii prime, creșterea utilizării recreative a zonelor împădurite, creșterea continuă a zonei de interferență între mediul natural și cel construit, informarea și conștientizarea publicului inadecvate, sunt câțiva dintre factorii principali care conduc la creșterea riscurilor de incendii forestiere.

Considerând acestea și luând în considerare tendința de intensificare a manifestării incendiilor de pădure în țara noastră remarcată în ultimele două decenii, este necesar și oportun studierea acestui fenomen atât natural cât și antropic astfel încât să fie generate informații care să conducă la creșterea gradului de pregătire și prevenire la incendii de pădure și la o înțelegere mai aprofundată a acestui tip de risc.

Cercetările întreprinse în cadrul acestei teze de doctorat constituie un demers în sprijinul acestui deziderat, urmărind să studieze fenomenul incendiilor de pădure utilizând tehnologii geospațiale moderne cum ar fi teledetecția și sistemele informatice geografice. În acest sens, prin combinarea unor seturi de date geospațiale reprezentând factorii topografici, antropici de vegetație și climatici, au fost testate două modele pentru cartarea hazardului la incendii de pădure pentru teritoriul României și totodată s-au identificat și analizat factorii determinanți a acestora. Cartarea tipurilor de combustibili de vegetație, forestieri și neforestieri, este de importanță în prognoza pericolului la incendiu dar și în modelarea comportamentului acestuia. Prin urmare unul dintre obiectivele tezei s-a concentrat în jurul acestui aspect.

Totodată, prin combinarea imagisticii satelitare de înaltă și medie rezoluție temporală și spațială (i.e. Sentinel 2, PlanetScope Dove, MODIS, VIIRS) și a produselor derivate din acestea, a fost elaborată o metodă pentru determinarea suprafeței afectate de incendiu și evaluarea severității incendiului pentru păduri de salcâm afectate de incendii și totodată a fost explorat potențialul acestor imagini în vederea detectării și localizării incendiilor de pădure și urmărirea evoluției acestora.

SHORT RESUMES

Forests and forest ecosystems are of exceptional importance for social, economic, and environmental viability and development. They play significant roles in rural and urban communities, providing complex goods and services and protecting biodiversity.

Major social and economic changes in land use in our country, driven by population movements from rural to urban areas, abandonment of traditional land use in rural areas, reduced use of forests for raw material production, increased recreational use of forested areas, continuous growth of the wildland-urban interface area, and inadequate public information and awareness are some of the main factors leading to increased forest fire risks.

Considering these factors and the observed trend of increasing forest fire incidents in our country over the past two decades, it is necessary and timely to study this natural and anthropogenic phenomenon to

generate information that will lead to improved preparedness and prevention of forest fires and a deeper understanding of this type of risk.

The research undertaken in this doctoral thesis supports this goal, aiming to study the phenomenon of forest fires using modern geospatial technologies such as remote sensing and geographic information systems. In this regard, by combining geospatial data sets representing topographic, anthropogenic, vegetation, and climatic factors, two models were tested for forest fire hazard mapping in Romania. Additionally, the determining factors were identified and analyzed. Mapping types of vegetation fuels, both forest and non-forest, is essential for fire danger prediction and modeling its behavior. Therefore, one of the thesis objectives focused on this aspect.

Furthermore, by combining high and medium temporal and spatial resolution satellite imagery (i.e., Sentinel 2, PlanetScope Dove, MODIS, VIIRS) and their derived products, a method was developed for determining the area affected by fire and assessing fire severity for acacia forests affected by fires. The potential of these images for detecting and locating forest fires and monitoring their evolution was also explored.