

REZUMATUL TEZEI DE ABILITARE

**Contribuții la caracterizarea avansată a
proprietăților optice și de masă ale aerosolilor
atmosferici prin sinergia tehnicilor de teledetecție și
a modelelor atmosferice**

Conf. univ. dr. Marius Mihai CAZACU

Iași – 2026

Universitatea „Alexandru Ioan Cuza” din Iași

Rezumat

Aerosolii atmosferici continuă să fie una dintre cele mai mari surse de incertitudine în analiza foringului radiativ și în proiecțiile climatice. Variația fluxului radiativ net, în acest context, este produsă de modificarea unor factori externi ai sistemului climatic cum sunt: aerosolii, gazele cu efect de seră, albedoul de suprafață etc. O variație pozitivă indică un surplus de flux energetic absorbit de sistemul climatic (efect de încălzire), iar o variație negativă indică un deficit de flux energetic (efect de răcire).

În evaluarea IPCC¹ (capitolul 7.3.3), foringul radiativ total antropogen pentru perioada 1750–2019 este pozitiv, dominat de creșterea concentrațiilor de gaze cu efect de seră, ceea ce indică o tendință netă de încălzire a sistemului climatic. Contribuția principală provine de la dioxidul de carbon (CO₂), urmat de următoarele gaze cu efect de seră în stare mixată (metanul: CH₄, protoxidul de azot: N₂O și compușii halogenați), în timp ce ozonul și vaporii de apă stratosferici adaugă contribuții pozitive suplimentare, dar cu o influență minoră. Schimbările albedoului de suprafață sunt datorate modificărilor de utilizare a terenului (defrișări, extinderea suprafețelor agricole) și a depunerii de particule absorbante pe zăpadă și gheață și reprezintă de asemenea un foring radiativ pozitiv modest, amplificând încălzirea. Aerosolii antropogeni, în schimb, exercită în ansamblu un foring radiativ negativ (efect de răcire), prin interacțiuni atât cu radiația cât și cu norii, parțial compensând foringul radiativ pozitiv al gazelor cu efect de seră. Monitorizarea sistematică, prin măsurarea și determinarea proprietăților optice ale aerosolilor (AOD², SSA³, raport lidar, depolarizare, etc.) pe serii lungi de timp, aduce contribuții semnificative privind incertitudinea parametrilor de intrare utilizați în modelele de transfer radiativ, îmbunătățind astfel calculul foringului radiativ prin efectul direct. Modele de referință recunoscute de literatura științifică includ OPAC⁴, POLIPHON⁵ și AERONET⁶.

¹ Intergovernmental Panel on Climate Change: <https://www.ipcc.ch/>

² AOD - adâncimea optică a aerosolilor

³ SSA - albedoul împrăstierii singulare

⁴ Optical Properties of Aerosols and Clouds

⁵ Polarization Lidar PHOtometer Networking

⁶ Aerosol Robotic Network, <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>

Infrastructuri europene precum ACTRIS⁷ au ca obiectiv explicit furnizarea de date pe baza unor serii temporale de observații standardizate pe termen lung ale proprietăților optice ale aerosolilor (din întreaga coloană atmosferică și din profil vertical), pentru documentarea efectelor aerosolilor, norilor și gazelor reactive cu timp de viață scurt (ore, zile) asupra climei și calității aerului.

În România, contextul privind propunerea unei rețele lidar la nivel național îl reprezintă EARLINET⁸, fondată în anul 2000 ca proiect de cercetare al Comisiei Europene, cu scopul de a crea o bază de date statistică a distribuției verticale a aerosolilor la scară continentală. Stația lidar (RALI⁹) de la București-Măgurele (INOE¹⁰) a aderat la EARLINET începând cu noiembrie 2005, sub coordonarea Dr. Doina Nicolae. ROLINET¹¹ a fost implementat între anii 2008 și 2011 ca inițiativă națională de consolidare a capacităților României în teledetecția atmosferică prin sisteme lidar. Proiectul a fost finanțat național (PNCDI-II) și a reunit un consorțiu format din centre de cercetare și universități precum: INOE, ANM¹², UPT¹³, UAIC¹⁴, UBB¹⁵. Obiectivul principal a fost crearea primei rețele de sisteme lidar în România, optimizate pentru monitorizarea continuă a distribuției verticale a aerosolilor, cu integrare în EARLINET, GAW¹⁶ și GEOSS¹⁷. Simultan, prin coordonarea de către INOE, a fost inițiat proiectul RADO¹⁸, finanțat prin Programul Norvegian de Cooperare cu România, cu perioada de implementare 2009÷2011.

RADO și-a propus crearea primului observator atmosferic 3D din România (și unicul din SE-ul Europei la acea vreme), dedicat cercetării și monitorizării proceselor atmosferice din stratul limită planetar și troposfera liberă. AERONET în România a fost implementat prin infrastructura și tehnicile dezvoltate în cadrul proiectelor ROLINET și RADO.

⁷ Aerosol, Clouds and Trace Gases Research Infrastructure, <https://www.actris.eu/>. ACTRIS coordonează instrumente de teledetecție (lidar, fotometre, radare de nori) și măsurători in situ, cu proceduri de calibrare și control al calității recunoscute de literatura științifică. ACTRIS impune protocoale comune de operare, astfel încât datele să fie direct comparabile cu cele din restul Europei.

⁸ European Aerosol Research Lidar Network, <https://www.earlinet.org>

⁹ System lidar Raman multi-lungime de undă cu depolarizare

¹⁰ Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Optoelectronică - INOE 2000

¹¹ Romanian Lidar NETwork

¹² Administrația Națională de Meteorologie

¹³ Universitatea Politehnică Timișoara

¹⁴ Universitatea „Alexandru Ioan Cuza” din Iași

¹⁵ Universitatea Babeș-Bolyai

¹⁶ Global Atmosphere Watch

¹⁷ Global Earth Observation System of Systems

¹⁸ Romanian Atmospheric research 3D Observatory

În prezenta teză de abilitare au fost descrise succint studiile efectuate după obținerea titlului de doctor, ce au vizat identificarea fenomenelor fizice care controlează cât din iradianța solară este absorbită sau împrăștiată de aerosolii atmosferici, caracterizarea parametrilor optici și microfizici ai aerosolilor la frontiera estică a ACTRIS (cu utilizare directă în evaluarea modelelor regionale de climă și poluare a aerului). În contextul infrastructurii europene ACTRIS, componenta centrală a prezentei teze de abilitare este reprezentată de fizica interacțiunii radiației electromagnetice cu materia (aerosoli, nori), cuantificată prin mărimi optice măsurabile (ex: AOD, AE¹⁹, raport lidar, depolarizare, albedo de împrăștiere unic, etc.) prin tehnici moderne de teledetecție (lidar, fotometrie solară), utilizate pentru a caracteriza tipurile de aerosoli (din diverse surse: praf Saharian, arderi de biomasă, cenușă vulcanică etc.), pentru a caracteriza variabilitatea sezonieră, pentru determinarea rolului structurii PBL în dispersia aerosolilor și pentru evaluarea riscului calității aerului (ca aplicație operațională a identificării proprietăților optice ale aerosolilor). Mai mult, prin prezentarea unor studii de caz sunt propuse metode noi care să răspundă provocării de a discerne variațiile relativ mici ale parametrilor optici ai aerosolilor integrați pe coloana atmosferică.

Majoritatea experimentelor și măsurătorilor (monitorizărilor) au fost efectuate în Laboratorul de Optică Atmosferică, Spectroscopie și Laseri (stație de monitorizare RADO-Iași în cadrul ACTRIS-RO), din cadrul Facultății de Fizică, Universitatea „Alexandru Ioan Cuza” din Iași și în strânsă colaborare cu cercetători și cadre didactice din rețeaua ACTRIS și ACTRIS-RO: Departamentul de Teledetecție și centrul de cercetare MARS²⁰ (stație de monitorizare RADO-București în cadrul ACTRIS-RO) din cadrul INOE; ACTRIS-UBB (stație de monitorizare RADO-Cluj), Facultatea de Știința și Ingineria Mediului, Universitatea „Babeș-Bolyai”, Cluj-Napoca; Platforma de observare a schimbărilor climatice (POSC Fix) din cadrul centrului de cercetare REXDAN²¹ (stație de monitorizare RADO-Galați în cadrul ACTRIS-RO), Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați; Departamentul Ingineria și Managementul Mediului, Facultatea de Inginerie Chimică și Protecția Mediului „Cristofor Simionescu”, Universitatea Tehnică “Gheorghe Asachi” din Iași; Laboratorul de Microscopie Electronică și Analiză Chimică, Facultatea de Știința și Ingineria Materialelor, Universitatea Tehnică “Gheorghe Asachi” din Iași; Facultatea de Geografie și Geologie, Universitatea „Alexandru Ioan Cuza” din Iași; Administrația Națională de Meteorologie, Centrul Regional

¹⁹ exponentul Ångström

²⁰ Magurele Atmosphere and Radiation Site

²¹ Sistem integrat pentru cercetarea și monitorizarea complexă a mediului în aria fluviului Dunărea

de Prognoză Bacău; Universitatea Politehnică din Timișoara; Laser Remote Sensing Unit, Physics Department, National Technical University of Athens, Greece; Université des Sciences et Techniques de Lille, Laboratoire d'Optique Atmosphérique, Villeneuve d'Ascq, France. De asemenea, accesul la anumite infrastructuri au fost posibile prin colaborare cu: SC INOESY SRL, Iași, România; SC EnviroScopY SRL, Iași, România; Raymetrics SA, Atena, Grecia.

Arhitectura tematică a prezentei teze de abilitare este ilustrată schematic prin diagrama conceptuală prezentată mai jos în Figura 1. Elementul central al acestei diagrame sintetizează cadrul metodologic teoretic și experimental descris în Capitolele 1 și 2, care constituie fundamentul instrumental și procedural al cercetărilor efectuate.

Este important de subliniat că o parte dintre metodele și tehnicile prezentate în aceste capitole nu reprezintă exclusiv instrumente preluate din literatura de specialitate, ci au fost dezvoltate, adaptate și validate chiar în cadrul studiilor ce compun prezenta teză de abilitare, constituind astfel contribuții originale pe care le-am raportat după obținerea titlului de doctor.

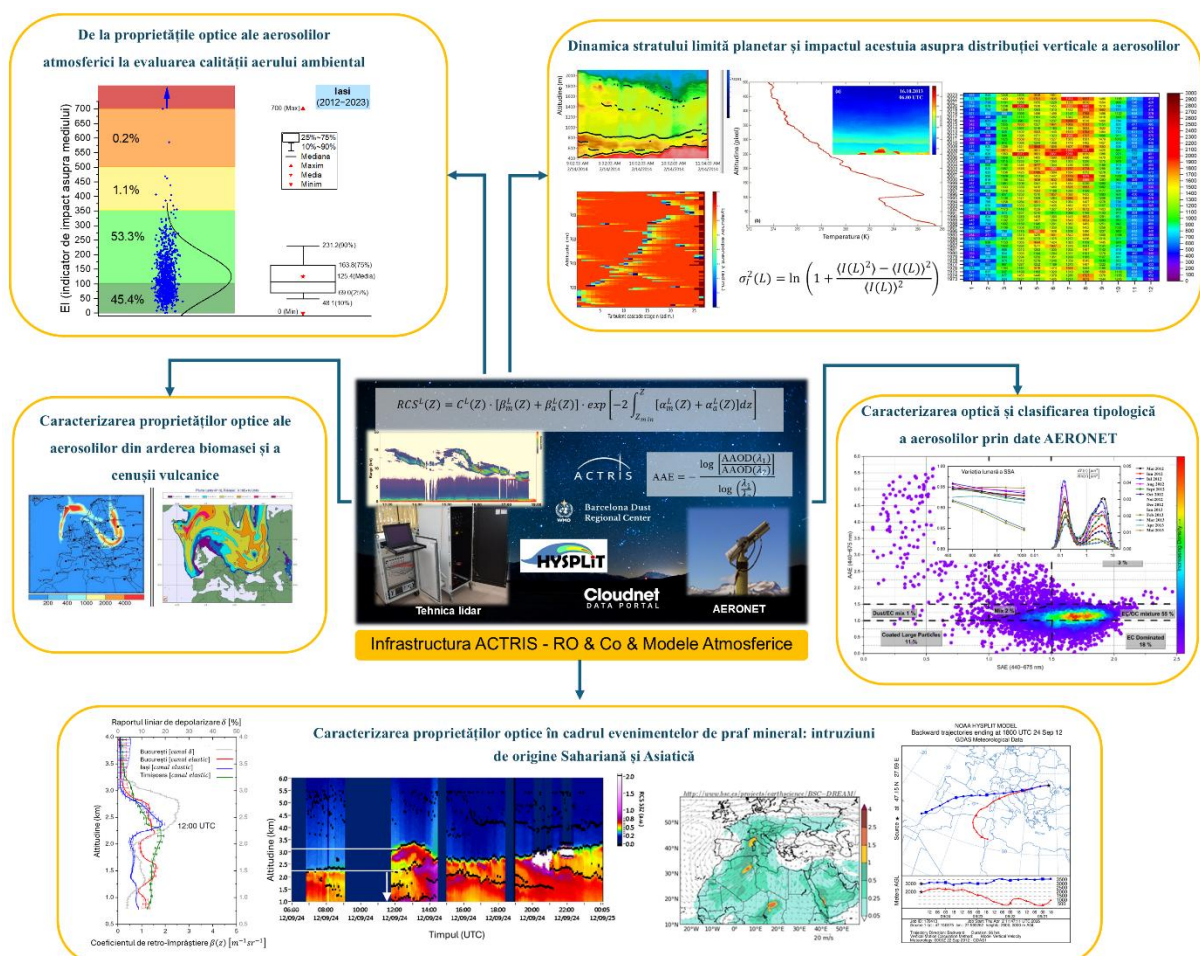


Figura 1: Reprezentare schematică a arhitecturii tematică a tezei de abilitare

Pornind de la acest nucleu metodologic (infrastructura de teledeteție atât din cadrul ACTRIS cât și a unor parteneri instituționali, modelele atmosferice utilizate), diagrama evidențiază principalele direcții tematice abordate în Capitolul 3, dedicat prezentării și discutării rezultatelor originale, fiecare subcapitol corespunzând unui nod specific din schema propusă. Această reprezentare grafică are un caracter selectiv în raport cu conținutul integral al tezei. Capitolul 4, dedicat prezentării direcțiilor viitoare de cercetare și demonstrarea capacității individuale de a coordona echipe de cercetare, depășește cadrul tematic al acestei diagrame și este tratat în mod independent, scopul acestei diagrame conceptuale fiind acela de a oferi o perspectivă de ansamblu pentru înțelegerea corelațiilor dintre metodele utilizate și rezultatele obținute.

În cadrul acestei teze de abilitare au fost prezentate rezultatele științifice privind amestecurile de aerosoli, tipul de aerosol predominanți în cadrul unor evenimente de poluare, rolul structurii PBL în dispersia aerosolilor, folosind date multi-instrumentale și modele numerice. De exemplu, s-a observat că în mediul urban încărcarea de fond este dominată de aerosoli continentali fini de origine urban-industrială și trafic, cu valori mari ale exponenților Ångström și fracție de mod fin ridicată, în special iarna, indicând predominanța surselor locale.

În cadrul studiilor din zona urbană a orașului Iași am arătat că în vara anului 2012 tipul major de aerosol este cel de tip urban/industrial, iar influența prafului mineral și a arderilor de biomasă se evidențiază în episoadele de poluare ce s-au suprapus peste acest fond. În București, analiza pentru perioada 2015–2024 arată valori medii pentru AOD scăzute și pentru AE ridicate, cu aerosoli dominanți de tip continental și urban-industrial, fumul și praful mineral apărând în cazul episoadelor de poluare. În Grecia (Atena), sursele locale urbane determină un strat inferior (sub 1,5 km) cu un coeficient de retro-împrăștiere ridicat și depolarizare mică, asociat poluării de trafic și industriale, bine separate de straturile de praf din troposfera liberă.

În ceea ce privește transportul aerosolilor pe distanțe mari, s-au prezentat rezultate din diferite campanii de măsurători. De exemplu, în cadrul campaniei de măsurători AGRO (septembrie 2012) am surprins un episod de praf Saharian care a traversat succesiv Grecia și România, cu straturi de praf bine definite între 2 și 4 km deasupra Atenei, Oxyolithos, Timișoara, București și Iași, HYSPLIT confirmând originea în nordul Saharei și traiectorii peste Mediterană și Italia. În orașul București, analiza pe 10 ani confirmă că praful Saharian și din Orientul Mijlociu este detectat mai ales primăvara și vara la altitudini între 2 și 8 km, în timp ce straturile de fum din Africa de Nord, America de Nord și Europa apar mai ales vara și în

troposfera joasă. Sahara rămâne sursa dominantă de praf mineral transportat spre Europa și România, cu transportul facilitat de cicloanele mediteraneene cu centrul în sudul Italiei și de circulația Sud-Vest spre Nord-Est. Totuși, există surse secundare semnificative: Orientul Mijlociu (primăvara-vara), stepa Kalmâcă și câmpia Turan din Asia Centrală, identificate în evenimentul din august 2022 din estul României.

De asemenea au fost prezentate rezultate privind dinamica stratului limită planetar (inversiuni, circulație atmosferică locală) ce influențează reținerea poluanților locali (PM-uri, gaze) și modul în care aceștia pot forma mixturi în funcție de predominanța tipului de aerosol din troposfera liberă.

Pe baza teoriei turbulenței, în studii recente, am interpretat canalele laminare ca fiind trasee preferențiale de transport vertical (pentru aerosoli, apă/gheață) în coloana atmosferică, identificate din măsurători lidar (ceilometre) de la stațiile ACTRIS: INOE-București, UGAL-Galați.

Spre finalul Capitolului 3, am prezentat, prin utilizarea valorilor AOD (AERONET) și a riscului integrat, o procedură de rescalare diferențiată pentru o clasificare a riscului aplicabil direct politicilor și standardelor de calitate a aerului. Prin analiza raportului PM_{2.5}/PM₁₀ în zonele urbane din Suceava, Iași și Botoșani pentru perioade de peste 5 ani am arătat că, deși mediile anuale ale PM respectă limitele, raportul PM_{2.5}/PM₁₀ este ridicat iarna și scade vara, ceea ce indică predominanța surselor antropice de combustie (încălzire rezidențială, trafic) în sezonul rece și a surselor grosiere/naturale în sezonul cald. Astfel, prin analiza statistică a concentrațiilor de PM_{2.5} și PM₁₀ am propus indicatori noi utilizabili în scenariile de conformare, planuri de calitate a aerului și prioritizarea măsurilor.

În Capitolul 4, am propus teme noi de cercetare, care vizează continuarea și aprofundarea investigațiilor privind stratul limită planetar valorificând infrastructura și expertiza acumulate prin participarea la rețeaua ACTRIS-RO, reflectate în majoritatea studiilor prezentate în această teză (ca autor principal și co-autor).

Aceste direcții de cercetare beneficiază de un cadru instrumental consolidat, așa cum sunt sistemele lidar Raman și ceilometrele operaționale la stațiile ACTRIS-RO, precum și de o experiență personală extinsă în prelucrarea și interpretarea datelor de teledetecție pasivă și activă. Monitorizarea continuă a înălțimii PBL prin aceste sisteme, cu focalizare pe identificarea automată a inversiunilor termice nocturne și pe corelarea acestora cu episoadele de ceață densă și poluare cu PM_{2.5}/PM₁₀, reprezintă o provocare științifică actuală cu

implicații directe asupra calității aerului și prognozei meteorologice. Una dintre direcțiile de cercetare se înscrie în continuitatea studiilor deja inițiate, printre care se remarcă prima climatologie a PBL-ului pentru sudul României, realizată pe o perioadă de 50 de ani (1973–2023), prin care am evidențiat o tendință semnificativă de creștere a înălțimii stratului mixt după anul 2000, corelată cu intensificarea convecției termice în contextul schimbărilor climatice regionale. În același context, o altă direcție de cercetare propusă vizează integrarea senzorilor de cost redus (LCS) într-un sistem hibrid de prognoză a calității aerului pe termen scurt (1÷2 ore), prin fuziunea datelor LCS cu datele stațiilor de referință ce alcătuiesc Rețeaua Națională de Monitorizare a Calității Aerului (RNMCA) și cu parametrii fizici ai PBL-ului derivați din teledetecție activă (lidar, ceilometru). În cazul aerosolilor de tip mixtură, proprietățile optice diferă semnificativ de cele ale componentelor „pure”, atât din punct de vedere spectral, cât și al eficiențelor de împrăștiere și absorbție, ceea ce complică parametrizarea lor în modele și interpretarea directă a măsurărilor standard. Această complexitate justifică necesitatea unor studii orientate pe „amprenta” locală a mixturilor de aerosoli, care să combine serii lungi de observații optice și microfizice cu informații despre surse și condiții de transport, nu doar pentru a descrie particularitățile regionale, ci și pentru a contura mai clar limitele de aplicabilitate ale parametrilor optici clasici și ale schemelor de amestec utilizate în prezent. Astfel, am propus o nouă direcție de cercetare în studiul aerosolilor urbani complecși și a parametrilor optici avansați. Legătura între proprietățile optice (AOD, SSA, depolarizare) și compoziția chimică în medii urbane și suburbane, va prezenta „semnături optice” ale diferitelor surse cum ar fi: trafic, încălzire rezidențială, episoade mixte cu praf Saharian. Mai mult, prin caracterizarea higroscopicității și a creșterii adâncimii optice cu umiditatea relativă din date lidar de tip Raman, se leagă direct fizica particulelor (adică relația mărime-compoziție-apă) de episoadele de smog și de efectele radiative în zone urbane. În cadrul acestei direcții se vor testa metode noi de inversie și clasificare care să combine datele lidar, ceilometru, fotometru și, unde există, date in situ pentru a caracteriza proprietățile optice și microfizice ale aerosolilor urbani și periurbani (inclusiv BC, fum, praf, amestecuri).

A fost demonstrată capacitatea autorului de a coordona echipe de cercetare (director a două granturi de cercetare, membru în comisii de îndrumare a unor doctoranzi, membru în comisii de analiză și susținere de teze de doctorat) și de a gestiona activități didactice (laboratoare și seminarii noi, contribuții la realizarea unui îndrumar de laborator, mobilități de predare).