



**UNIVERSITATEA  
BABEȘ-BOLYAI**

**FACULTATEA DE ȘTIINȚA  
ȘI INGINERIA MEDIULUI**



**UNIVERSITATEA BABEȘ-BOLYAI  
FACULTATEA DE ȘTIINȚA ȘI INGINERIA MEDIULUI  
ȘCOALA DOCTORALĂ DE ȘTIINȚA MEDIULUI**

# **TEZĂ DE DOCTORAT REZUMAT**

**Metode și tehnici de identificare și analiză a fumului din  
incendii petroliere utilizând date satelitare sinergice**

**CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC**

**Prof. univ. dr. ing. Ozunu Alexandru**

**DOCTORAND**

**Mereuță Alexandru**

**Cluj-Napoca**

**2023**

## Cuprinsul tezei de doctorat

<b>Lista de acronime</b>	6
<b>1. Introducere</b>	13
1.1 Obiective	16
<b>2. Considerații teoretice</b>	18
2.1 Utilitatea tehnicilor satelitare în managementul dezastrelor	18
2.2 Conceptualitatea hazardului și a riscului	20
2.3 Era satelitară în sprijinul DRM	21
2.4 Principalele misiuni satelitare de observare a Pământului	29
2.4.1 Sistemul de Observare a Pământului (EOS) NASA	29
2.4.2 Programul European de Observare a Pământului	31
2.5 Aerosolii atmosferici și efectele asupra sănătății umane	32
2.6. Impactul aerosolilor asupra activităților antropice	34
2.7 Emisii antropogene din arderea combustibililor fosili	36
2.8 Achiziția AOD-ului prin tehnici de teledetecție satelitară	39
2.9 Date satelitare utilizate în studii de calitate a aerului	42
2.10 Efectele reflectanței suprafeței terestre în ecuația AOD-ului satelitar	43
2.11 Metode de achiziție a proprietăților aerosolilor	46
2.11.1 Proprietățile aerosolilor atmosferici	48
2.11.2 Proprietăți optice ale aerosolilor	50
2.11.3 Rețeaua AERONET	54
2.11.4 Teledetecția satelitară pasivă	56
2.12 Algoritmi de achiziție AOD	58
2.12.1 Metoda de reducere a contrastului	58
2.12.2 Algoritm țintă întunecată asupra terenului vegetat (DT land)	59
2.12.3 Algoritm Țintă Întunecată asupra oceanului (DT ocean)	63
2.12.4 Algoritm Albastru Întunecat (DB)	63

2.13 Starea actuală a cunoașterii, senzori satelitari capabil de achiziția AOD	66
2.14 Tehnici active – LIDAR	69
<b>3. Descrierea evenimentelor studiate</b>	72
<b>4. Tehnici și metode utilizate în studiu</b>	83
4.1 MODIS	83
4.2 CALIPSO	85
4.3 MERRA-2	87
4.4 PM2.5 și harta de hazard	89
4.5 Metoda sinergică dezvoltată	90
<b>5. Rezultate și discuții</b>	96
5.1 Studiu de caz descriptiv	96
5.2 Achiziții reușite MODIS	104
5.3 Achiziții nereușite MODIS	114
5.4 Achiziții CALIPSO	117
5.5 Studiu de caz AERONET	128
5.6 Discuții și studii similare	129
<b>6. Concentrații PM 2.5 și harta hazardului</b>	136
<b>7. Concluzii</b>	139
7.1 Concluzii specifice	139
7.2 Concluzii generale	142
<b>8. Contribuții personale</b>	146
<b>9. Perspective</b>	148
<b>10. Lista de publicații și participări la manifestări științifice</b>	150
Anexa 1	160
Anexa 2	161
Anexa 3	163
Anexa 4	165
Anexa 5	167

Anexa 6	170
<b>Bibliografie</b>	<b>174</b>

## **Cuvinte cheie**

Hazard și risc

Sateți de observare a Pământului

Aerosoli atmosferici

Fum din incendii petroliere

Clasificarea aerosolilor de fum

Concentrații de PM2.5

Calitatea aerului

## 1. Introducere

Emisiile de substanțe potențial periculoase, atât în stare gazoasă, cât și în stare condensată contribuie la creșterea concentrațiilor de gaze minore și particule. Aceste concentrații antropogenice sunt principala sursă de impact asupra schimbărilor climatice globale și a diminuării calității aerului.

Definirea tipurilor de aerosoli este o sarcină dificilă, deoarece aceștia posedă un grad mare de varianță în compoziție și concentrație, datorită diferitelor perioade de reședință atmosferică, depunerii uscate și umede, diverselor surse și rate de emisii, traiectoriilor de transport și variabilității sezoniere (Dutkiewicz et al., 2009; Li et al., 2015; Mereuță et al., 2022; Samset et al., 2018).

Efectele asupra sănătății asociate atât cu expunerea pe termen scurt, cât și pe termen lung la aerosoli au fost documentate pe scară largă în literatura științifică (Brauer et al., 2016; Zhang and Batterman, 2013).

Cu toate acestea, înțelegerea științifică a impactului aerosolilor în schimbările climatice globale este deosebit de slabă existând mari incertitudini. Comunitatea umanitară precum și eforturile de răspuns la dezastre se folosesc din ce în ce mai mult sistemele de observare a Pământului (EO) prin satelit pentru a evalua impactul și pentru a planifica și coordona activitățile de răspuns în caz de urgență după dezastre naturale și antropice majore din întreaga lume.

În acest context, teza de doctorat prezintă o metodologie nouă de identificare și analiza a fumului din incendii petroliere prin utilizarea unor date satelitare sinergice. Teza propune această abordare luând în calcul avantajele acoperiri globale ale acestor tehnici și aplicarea unor algoritmi de achiziție deja existenți. Astfel cuantificarea proprietăților aerosolilor studiați, definirea tipologiei acestora și estimarea concentrațiilor de particule materiale îmbunătățesc cunoașterea actuală în domeniu, totodată punând bazele unei aplicații noi de delimitare și cuantificare a hazardelor asociate acestor evenimente.

## 1.1 Obiective

Unul dintre obiectivele principale ale acestui studiu este de a evidenția importanța tehnicilor de teledetecție satelitare în identificarea acestor tipuri de evenimente. Instalațiile petrochimice pot fi situate în zone deșertice, pe mare sau în locații greu accesibile, departe de stațiile de monitorizare a calității aerului sau de stațiile AERONET (AERosol RObotic NETwork) (Holben et al., 1998). Abordările in situ, stațiile de la sol și instrumentele de modelare nu au accesibilitate, în cea mai mare parte, în zonele predispuse la conflicte armate sau care prezintă riscuri ridicate pentru sănătate. În plus față de acest avantaj, o abordare sinergică folosind diferite tipuri de instrumente satelitare poate oferi acoperire spațială tridimensională (Mereuță et al., 2022). Acest studiu se va concentra pe utilizarea de produse MODIS și CALIPSO în ceea ce privește aceste tipuri de aerosoli, subliniind, de asemenea, limitările metodologice. Folosind date de la ambele instrumente MODIS la bordul sateliților Terra și Aqua, am abordat evoluția temporală a penelor de fum. Prin intermediul datelor CALIPSO am evaluat proprietățile specifice Lidar și dezvoltarea în altitudine a penelor de fum (Mereuță et al., 2022). La nivelul actual al științei, nu am identificat alte studii similare care să se concentreze în mod special pe tema achiziției proprietăților aerosolilor rezultați din accidente petrochimice majore, utilizând o abordare sinergică de produse satelitare (Mereuță et al., 2022). Determinarea proprietăților optice și microfizice ale acestor pene de fum este importantă din perspectiva îmbunătățirii modelelor ce estimează bugetul radiativ al atmosferei. Aceste modele sunt deosebit de importante pentru studiile climatologice globale și pentru potențialele efecte asociate. De asemenea o cuantificare corectă a acestui tip de aerosol va putea duce la îmbunătățirea metodelor de achiziție satelitare. Riscul asociat sănătății umane duce la conturarea unui alt obiectiv final al tezei de doctorat. Astfel studiul își propune o metodă de estimare a concentrațiilor de particule materiale și de delimitarea zonelor de influență hazardului. Pentru comunitatea ce studiază calitatea aerului, acest studiu poate aduce o tehnică nouă de observare a carbonului negru și poate fi folosit în mod sinergic în descrierea evoluției în timp și spațiu a unor astfel de pene de poluant.

## 2. Considerații teoretice

Sateliții de observare a Pământului (EO) oferă un punct de vedere privilegiat pentru monitorizarea mai multor variabile geofizice, inclusiv în zone ale globului care sunt greu de accesat. Datele EO oferă informații despre starea mediului și modificările acestuia, astfel contribuind la proiectarea și dezvoltarea politicilor de mediu sau la modelarea dimensiunii de mediu a altor politici (Tassa, 2020). De exemplu, ele pot informa eforturile dedicate conservării resurselor naturale (Finer et al., 2018), susține gestionarea situațiilor de urgență și planificarea măsurilor de reducere a riscului de dezastre (Muthike, 2015).

Aerosolii atmosferici sunt amestecuri complexe din punct de vedere chimic de particule solide și lichide suspendate dinamic în aer. Aceștia provin atât din emisii naturale, cât și antropice (Mereuță et al., 2022). Formele cele mai întâlnite de aerosoli sunt ceața, praf, sare marină, exudate biologice și fumul (arderea biomasei). Smogul și fum negru sunt de obicei rezultatul activităților industriale și de transport (Wei et al., 2020). Speciile distincte, cum ar fi carbonul negru (BC), carbonul organic (OC), sulfatii, nitrații, oligoelementele, sarea de mare, praful mineral și materia biologică suferă modificări atmosferice, rezultând combinații diferite de compuși (Mereuță et al. 2022). Aerosolii au un efect direct asupra distribuției radiațiilor prin împrăștierea, absorbția și emiterea luminii în profunzimea atmosferei (Mereuță et al., 2022). În plus, aceștia pot afecta sistemul climatic prin efecte indirecte cum ar fi apariția nucleilor de condensare a norilor, impactul asupra duratei de viață și asupra proprietăților norului, afectarea stabilității atmosferice și a factorului de precipitare (Samsat et al., 2018).

Emisiile de particule la nivel mondial au fost dominate de arderea combustibililor fosili (în principal cărbune) și arderea biomasei. Se estimează că aceste emisii se vor dubla până în anul 2040, în mare parte datorită creșterilor anticipate ale arderilor de combustibili fosili, care se estimează că vor apărea în principal în China și India (Ramanathan and Carmichael, 2008).



Fumul din substanțe petroliere și fum din arderi de biomasă (BB) diferă semnificativ în raportul OC/BC. Studiile arată valori cuprinse între 3 - 20 pentru BB (Andreae, 2019; Konovalov et al., 2018) depinzând în mare măsură de tipurile de combustibil. În ceea ce privește fumul din produse petroliere, raporturile OC/BC sunt mult mai mici tab 3: 0.83 – 1.05 (Daum et al., 1993; Ferek et al., 1992; Laursen et al., 1992), de asemenea, depinzând de tipurile de combustibil (Mereuță et al., 2022). Studiile raportează, de asemenea, un conținut mare de BC în aceste pene de fum unde, din conținutul total de PM-uri, BC reprezintă 46 - 50% pentru incendiile de baltă din Kuwait (Hobbs and Radke, 1992; Laursen et al., 1992; Stevens et al., 1993) până la 50 - 75% pentru incendiu de la Bouncefield (Mather et al., 2007) și 75 - 82% pentru penele generate de arderile petroliere din pe suprafață oceanică (Gullett et al., 2017, 2016; Ross et al., 1996).

Datorită influențelor complexe asupra mediului și sistemului climatic, evaluarea parametrilor-cheie ai aerosolului este esențială pentru orice studiu atmosferic. Adâncimea optică a aerosolului (AOD), extincția integrată vertical pe întreaga coloană atmosferică, este un parametru puternic corelat cu concentrațiile de PM (Mereuță et al., 2022). Împreună cu alte proprietăți, cum ar fi Exponentul Angstrom (AE), albedo împrăștierii singulare (SSA), distribuția dimensională și variațiile de concentrație cu înălțimea, putem descrie mai bine impactul lor atmosferic. Din anii 1970, au existat un număr semnificativ de senzori satelitari folosiți cu succes pentru preluarea AOD și a altor proprietăți ale aerosolului (Wei et al., 2020). Pentru a alege între diferitele produse specifice aerosolilor, trebuie să ținem seama de varietate de senzori și de caracteristicile lor, cum ar fi rezoluții spațiale, temporale și spectrale, metode de scanare, singulară sau cu mai multe vizualizări, design de intensitate sau polarimetric și algoritmi diferiți de achiziție (Sogacheva et al., 2020; Wei et al., 2020).

### **3. Descrierea evenimentelor studiate**

Această secțiune va rezuma o colecție de evenimente cuprinse între 2008 și 2020, care au fost identificate cu succes prin tehnici de teledeteție satelitare. În urma acestor evenimente au fost achiziționate o serie de proprietăți optice și microfizice din penele de fum rezultate și s-au efectuat analize statistice cu scopul de a descrie mai bine aceste tipuri de aerosoli (Mereuță et al., 2022). Caracteristicile evenimentelor au fost rezumate în tabelul 1.

Nr. ID	Locație	Observații MODIS		Coordonate	Cauze	Tip de instalație
		Început	Sfârșit			
1	Qayyara, Iraq	13.06.2016	27.03.2017	35.83 N ; 43.21 E	Conflict armat	Puțuri petroliere
2	Omidieh, Iran	06.05.2019	06.05.2019	30.84 N ; 49.65 E	Eroare umană	Conductă
3	Haradh, Hawiyah, Uthmaniyah, Shedgum, Buqayq; Arabia Saudită	14.09.2019	26.09.2019	24.05 N ; 49.20 E 24.80 N ; 49.35 E 25.18 N ; 49.31 E 25.64 N ; 49.39 E 25.92 N ; 49.68 E	Conflict armat	Rafinărie
4	Caspian Sea, Azerbaijan	06.12.2015	18.12.2015	40.20 N ; 51.06 E	Furtună	Platformă maritimă
5	Gulf of Mexico, USA	21.04.2010	21.04.2010	28.44 N ; 88.21 W	Cedare echipament	Platformă maritimă
6	Marea Chinei de Est, China	14.01.2018	14.01.2018	28.37 N ; 126.08 E	Eroare umană	Vas petrolier
7	Houston Texas, USA	18.03.2019	19.03.2019	29.43 N ; 95.05 E	Cedare echipament	Rezervor
8	Jaipur, India	30.10.2009	08.11.2009	26.77 N ; 75.83 E	Eroare umană	Rezervor
9	Sendai, Japan	12.03.2011	13.03.2011	38.27 N ; 141.03 E	Cutremur, tsunami	Rezervor
10	Vasyilkiv, Ukraine	09.06.2015	10.06.2015	50.16 N ; 30.32 E	Sabotaj	Rezervor
11	Ra's Lanuf, Libya	19.08.2008	25.08.2008	30.45 N ; 18.49 E	Eroare umană	Rezervor
12	Ra's Lanuf, Libya	12.03.2011	14.03.2011	30.45 N ; 18.49 E	Conflict armat	Rezervor
13	As Sidr, Libya	26.12.2014	31.12.2014	30.60 N ; 18.28 E	Conflict armat	Rezervor
14	Ra's Lanuf, As Sidr; Libya	05.01.2016	07.01.2016	30.45 N ; 18.49 E 30.60 N ; 18.28 E	Conflict armat	Rezervor
15	Surt disrtric, Libya	14.01.2016	14.01.2016	30.02 N ; 18.50 E	Conflict armat	Conductă
16	Ra's Lanuf, Libya	21.01.2016	23.01.2016	30.45 N ; 18.49 E	Conflict armat	Rezervor
17	Ajdaviya district, Libya	01.02.2016	01.02.2016	29.68 N ; 20.54 E	Conflict armat	Conductă
18	Ra's Lanuf, Libya	17.06.2018	21.06.2018	30.45 N ; 18.49 E	Conflict armat	Rezervor
19	Puebla, Mexico	19.12.2010	19.12.2010	18.96 N ; 98.45 W	Furt de conținut	Conductă
20	Escravos, Nigeria	04.01.2018	05.01.2018	5.45 N ; 5.35 E	Incendiu vegetație	Conductă
21	Puerto Sandino, Nicaragua	18.08.2016	19.08.2016	12.18 N ; 86.75 W	necunoscut	Rezervor
22	Golful Oman	13.06.2019	13.06.2019	25.39 N ; 57.38 E	Conflict armat	Vas petrolier
23	Catano, Puerto Rico	23.10.2009	24.10.2009	18.41 N ; 66.13 W	Eroare umană	Rezervor
24	Punto Fijo, Venezuela	27.08.2012	27.08.2012	11.74 N ; 70.18 W	Cedare echipament	Rezervor
25	Butcher Island, India	07.10.2017	08.10.2017	18.95 N ; 72.90 E	Fulger	Rezervor

Tabelul 1. Evenimente industriale majore ce au produs pene de fum observabile din imaginile MODIS RGB

## 4. Tehnici și metode utilizate în studiu

### 4.5 Metoda sinergică dezvoltată

Figura 1 prezintă un sinopsis al fiecărei etape a analizei pornind de la o colecție de evenimente identificate în literatura științifică precum și în articole de media locale. Am ales un interval de timp de 12 ani în care atât MODIS, cât și CALIPSO au achiziționat o cantitate substanțială de date atmosferice, provenite din penele de fum (Mereuță et al., 2022). Folosind imagini RGB MODIS putem identifica vizual fiecare eveniment (Tabelul 1) (Mereuță et al., 2022). Cei doi senzori MODIS de la bordul platformelor Aqua și Terra au fost folosiți deoarece posedă o serie de caracteristici avantajoase pentru identificarea și analiza penelor: acoperire globală zilnică, rezoluție bună a pixelilor, maturitate algoritmică, două ferestre de achiziție, arhiva mare de date (20 de ani de misiune). Datele CALIPSO au fost utilizate pentru a compara AOD-ul penelor și pentru a umple golurile din datele MODIS, cum ar fi: grosimea și elevația fumului, clasificarea scenei, clasificarea tipurilor de aerosoli (folosind raportul lidar și raportul de depolarizare a particulelor). Evenimentele identificate în literatură au fost selectate pe baza analizei dimensionare a penei și a condițiilor specifice de achiziție. Am selectat pene cu o acoperire mai mare de 500 km<sup>2</sup> pentru relevanță statistică, deoarece penele mai mici au produs un număr redus de pixeli în urma achiziției de date. Evenimentele au fost eliminate dacă scena atmosferică a fost predominant noroasă, cu o acoperire de peste 50% (Mereuță et al., 2022). Am considerat "achiziții reușite" acele achiziții de date care produc valori nenule ale pixelilor AOD, cu un anumit grad de variație (pentru cel puțin 50% din pixeli penelor de fum, valorile AOD ar trebui să varieze, rezultând diferențe de valoare de cel puțin 0.01), suprapunându-se cu aria penei. Am considerat o "achiziție nereușită" dacă achiziție peste zona penei nu a produs date AOD (după ecranarea norilor) sau în cazurile în care valorile AOD au fost mai mici de 0.1 iar pixelii rezultați au prezentat un grad de omogenitate ridicată (ex: peste 90% din pixelii penei au rezultat o valoare AOD fixă de 0.09). Am folosit atât achiziții reușite, cât și achiziții nereușite pentru a evidenția capacitățile și limitările senzorilor MODIS.

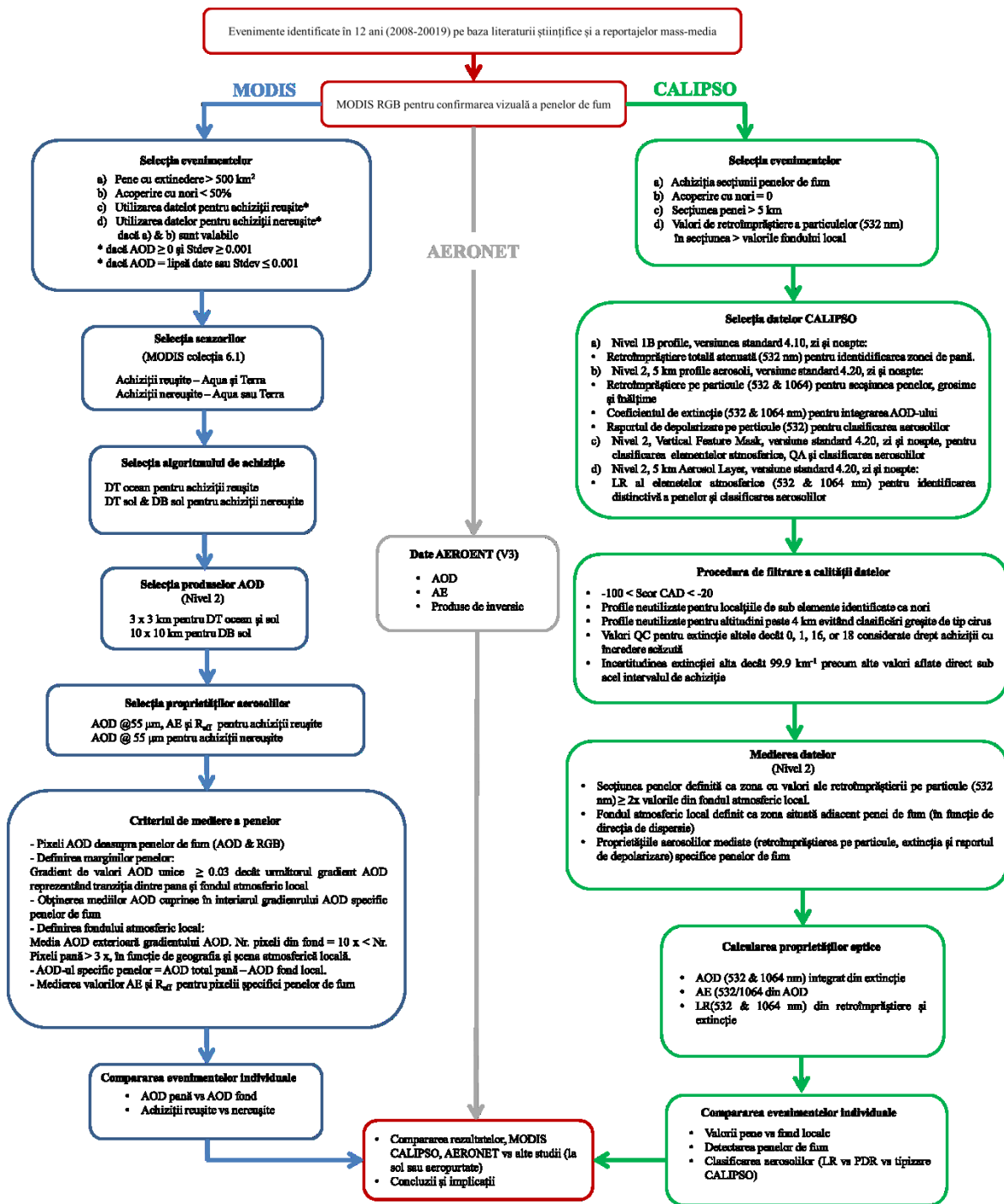


Figura 1. Algoritm metodologic

## 5. Rezultate și discuții

### 5.1 Studiu de caz descriptiv

Pe baza informațiilor prezentate în tabelul 1, am filtrat un total de 375 de zile în care au fost observate pane de fum de petrol prin senzorii MODIS. După aplicarea criteriilor de selecție pentru senzorul MODIS, am obținut un total de 10 zile cu achiziții de succes. Majoritatea penelor de fum de petrol au rezultat în achiziții nereușite, 70,7%, în timp ce 26,7% dintre ele au fost eliminate din cauza unui procent ridicat de acoperire cu nori (Mereuță et al., 2022). Prin aplicarea criteriilor de selecție pentru CALIPSO, am obținut un număr de 6 secțiuni de pane de fum potrivite pentru analiză (Mereuță et al., 2022). Tabelul 2 prezintă data achizițiilor MODIS și CALIPSO potrivite pentru analiză.

Tabelul 2. Lista achizițiilor reușite MODIS și CALIPSO cu data orbitei

<b>Nr. eveniment</b>	<b>MODIS (Terra și Aqua) data achiziției</b>	<b>CALIPSO data achiziției</b>
<b>1</b>	-	01.07.2016
		17.07.2016
		21.10.2016
<b>4</b>	08.12.2015	-
<b>5</b>	21.04.2010	-
<b>9</b>	11.03.2011	-
<b>11</b>	-	22.08.2008
	28.12.2014	-
<b>13</b>	29.12.2014	29.12.2014
	30.12.2014	-
	06.01.2016	06.01.2016
<b>16</b>	21.01.2016	-
<b>20</b>	19.08.2016	-
<b>21</b>	04.01.2018 (doar Aqua)	-

Am selectat o achiziție reușită pentru a descrie mai bine metoda utilizată în analiza noastră. Figura 2 prezintă evenimentul 14, cazul depozitelor de rezervoare Ra's Lanuf și As Sidr care au luat foc pe 5 ianuarie 2016 și au ars pe parcursul zilelor 6 și 7. Achiziția imaginilor a fost realizată pe 6 ianuarie la 12:05 UTC de MODIS Aqua. Figura 2a reprezintă o imagine compozită color real care arată pana de fum ieșind din ambele locații cu o direcție

de dispersie spre E-NE peste Golful Sidra. Evaluând doar această imagine, putem distinge doar părți ale penei de fum care par să fie mai puțin dispersate și prezintă astfel o proporție mai mică de amestec cu aerosolii de fond locali. În acest studiu, ne-am concentrat atenția asupra zonelor de până în care sunt prezente concentrații mari de aerosoli, în timp ce achizițiile realizate la marginile penei, unde aerosolul de fond poate avea o influență mare asupra valorilor recuperate, au fost eliminate (Mereuță et al., 2022). Astfel, figura 2b a fost construită pe baza achiziției de AOD ( $0,55 \mu\text{m}$ ) și a unei tehnici de selecție a marginii panii. Pentru a determina marginea panii, am construit izoliniile valorilor AOD din pixelii de achiziție. Produsul de  $3 \times 3 \text{ km}$  este mai potrivit pentru determinarea gradientelor AOD și, prin urmare, a fost selectat în detrimentul produsului standard de  $10 \times 10 \text{ km}$ . Figura 2b arată valori mai mari ale AOD-ului în zona de până de fum selectată spre deosebire de zona cu fond atmosferic local (Mereuță et al., 2022). La momentul achiziției, putem observa două pene distincte de fum, o pana subțire care provine de la As Sidr și pana principală (în interiorul conturului negru, Fig. 2b) care provine de la Ra's Lanuf. Deoarece pana de la As Sidr nu a îndeplinit criteriile de selecție, analiza se face pentru pana principală de la Ra's Lanuf (Mereuță et al., 2022). Pentru a discrimina în continuare valorile AOD ale penei și ale fondului local, am calculat media tuturor valorilor de pixel non-pană, peste apă, în regiunea golfului (Mereuță et al., 2022). Apoi, valorile medii AOD au fost scăzute din fiecare pixel al valorilor AOD peste regiunea penei pentru a determina contribuția totală a penei de fum. Prin urmare, Figura 2c ilustrează gradientul specific de AOD al penei. Figurile 2d și 2e arată AE ( $0,55/0,86 \mu\text{m}$ ) și Reff ( $\mu\text{m}$ ) care au fost selectate pentru clasificarea aerosolilor. Pentru AE și Reff am folosit aceeași tehnică de selecție a marginii ca cea descrisă mai sus, fără scăderea fondului local (Mereuță et al., 2022). AE prezintă valori foarte scăzute, indicând modul grosier dominant, ceea ce este evidențiat și de Reff mare ales din LUT. Este, de asemenea, evident din ambele figuri că ambele pene se extind mai departe de selecția marginii (Mereuță et al., 2022). În acest caz, media AOD specifică penei a fost de 0,13, în timp ce valorile fondului au fost în medie 0,08. Figura 2c arată valori AOD de până cu 0,24 peste nivelul mediu al fondului local pentru evenimentul de la Ra's Lanuf. Gradientul AOD, în figura 2c,

prezintă cele mai mari valori în centrul penei, unde se așteaptă amestecul aerosolilor să fie mai scăzut (Mereuță et al., 2022). Media AE a penei a fost de -0,18, spre deosebire de valoarea fondului local de 0,45, iar Reff-ul penei a arătat 1,45  $\mu\text{m}$  față de 0,51  $\mu\text{m}$  pentru fondul local.

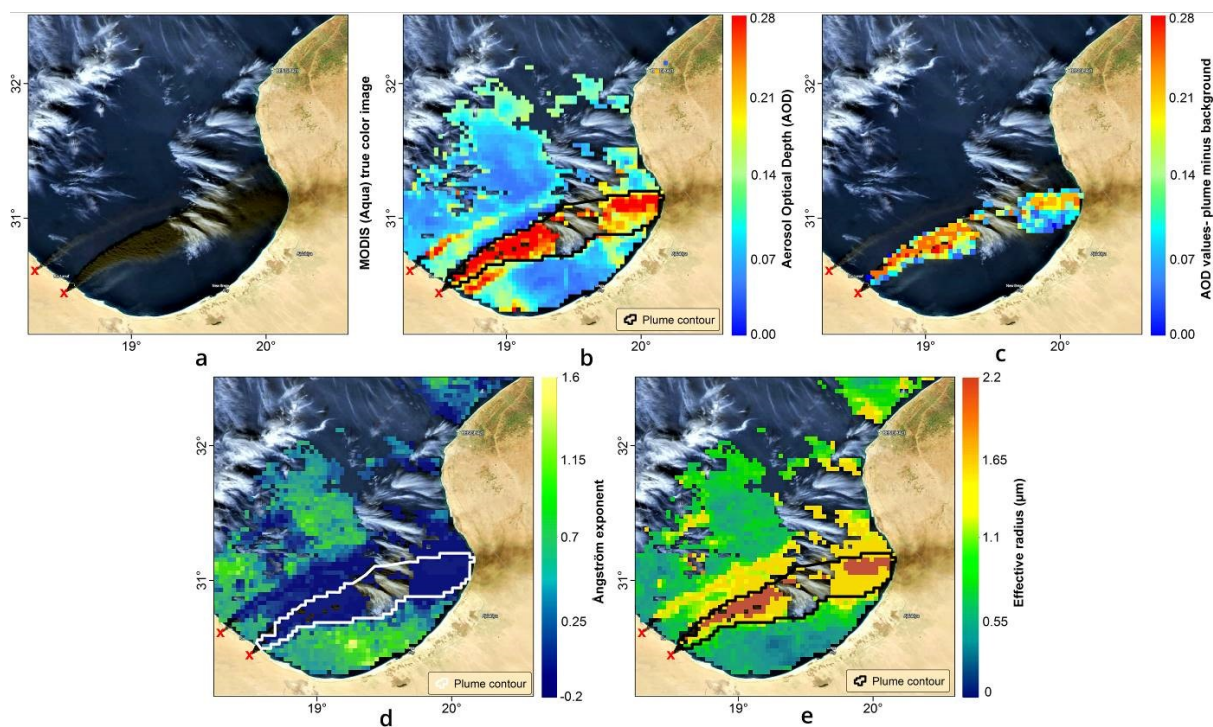


Figura 2. Reprezentarea vizuală a metodei de analiză pentru datele MODIS: a) – pene de fum observate în imagini RGB; b) – Achiziție reușită de AOD din zona penei și a fondului local (Golful Sidra); c) – achiziție de AOD specifică penei de fum (media fondului extrasă din valoarea individuală a pixelilor din pană); d) - Exponent Angstrom pentru zona penei și zona de fond; e) - Raza efectivă pentru zona penei și zona de fond; Locația instalației afectată de incendiu este notată cu "X" în culoare roșie. (Imaginile satelitare RGB preluate și reprocesate din NASA Worldview, <https://worldview.earthdata.nasa.gov>).

Figura 3 arată un exemplu de achiziție nereușită a algoritmului pentru suprafețe uscate specific penei evenimentului 13 din 30.12.2014. Putem distinge pana din imaginea RGB deasupra Golfului Sidra și observăm, de asemenea, valorile AOD deasupra terenului unde fumul s-a deplasat E-NE spre insula Creta. Cu toate acestea, nu pare să existe un gradient de AOD distingibil, deasupra uscatului, în secțiunea de pană (Mereuță et al., 2022). O inspecție ulterioară a sugerat că toți pixelii au produs valori de 0,095, ceea ce sugerează faptul că



valorile de radianță mai scăzute nu s-au potrivit bine cu valorile LUT preexistente (Mereuță et al., 2022). Prin urmare, regiunea este clasificată ca "atmosferă curată" și, astfel, o valoare unică AOD este atribuită tuturor pixelilor. Spre deosebire de algoritmul pentru uscat, algoritmul pentru ocean a achiziționat AOD care variază între 0,1 și 0,37. Deoarece aceste pane de fum sunt rezultatul unor scenarii extreme, sunt rareori observate, iar condiții specifice calculului de transfer radiative să nu se regăsească în algoritmul utilizat. Prin urmare, credem că nu există cazuri în valorile LUT care descriu transmitanța atmosferică și radianța extrem de scăzută, aerosolul puternic absorbant, SSA scăzut și valorile de reflectanță scăzute pe o gamă spectrală largă, inclusiv benzile MODIS 1 până la 7.

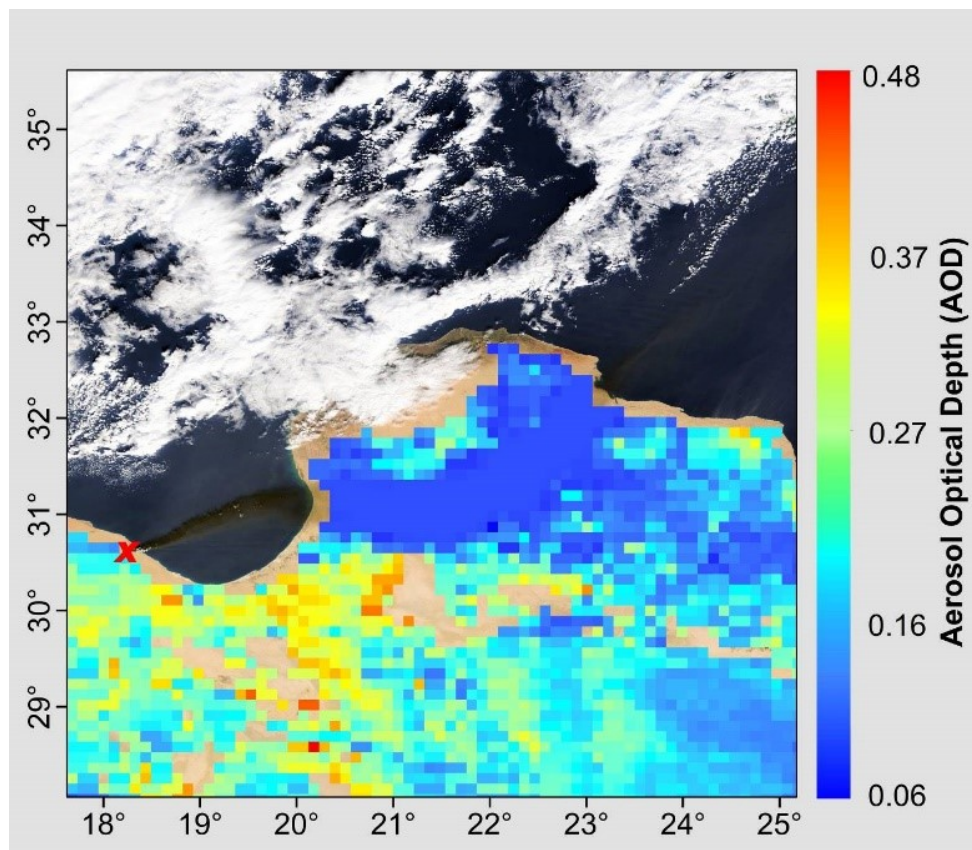


Figura 3. Achiziție (nereușită peste suprafață uscată) de AOD în zona penei de fum și a fondului local, evenimentul 13, 30.12.2014. Locația instalației afectată de incendiu este notată cu "X" în culoare roșie. (Imaginile satelitare RGB preluate și reprocesate din NASA Worldview, <https://worldview.earthdata.nasa.gov>).

Evenimentul 14 la Ra's Lanuf și As Sidr, din 6 ianuarie 2016, a fost, de asemenea, capturat de măsurătorile lidar CALIPSO deoarece trecerea CALIPSO a coincis cu o secțiune transversală a zonei penei. Figura 4a prezintă această suprapunere în timp aproape real, deoarece CALIPSO urmează Aqua într-un interval de timp de 2 minute. În cadrul secțiunii transversale de 15 km a penei, am selectat un profil de retroîmprăștiere pe particulă pentru referință, figura 4b, și, pe baza acestui parametru, am determinat elevația și grosimea penei (Mereuță et al., 2022). Grosimea medie a penei a fost de aproximativ 920 m. Baza stratului a fost situată între 2600 și 3100 m deasupra Golfului, în timp ce partea superioară a fost măsurată între 3300 și 4200 m (Mereuță et al., 2022). Întreaga secțiune transversală a penei este prezentată în figura 5a. Observăm pana principală de la Ra's Lanuf ridicat între 2600 m și 4200 m (Mereuță et al., 2022). Figura 5a prezintă, de asemenea, pana secundară de la As Sidr, la 0,2° nord de cea principală, situat în jurul valorii de 2000 m (Mereuță et al., 2022). Pe baza măsurătorilor CALIPSO ale penei principale, valorile medii ale coeficientului de retroîmprăștiere a particulei (532 nm) au fost de  $0,015 \text{ km}^{-1}\text{sr}^{-1}$ , în timp ce valorile la 1064 nm au fost de  $0,017 \text{ km}^{-1}\text{sr}^{-1}$ . Valorile medii ale coeficientului de extincție la 532 nm au fost măsurate la  $1,65 \text{ km}^{-1}$ , în timp ce canalul de 1064 nm a furnizat o valoare de  $1,55 \text{ km}^{-1}$  (Mereuță et al., 2022). Evenimentul prezentat este un exemplu de strat opac de aerosoli, unde lidarul nu a putut penetra până la suprafața mării peste Golful Sidra (Mereuță et al., 2022). Acest eveniment a înregistrat un raport lidar de  $109 \pm 47 \text{ sr}$  la 532 nm și  $86 \pm \text{sr}$  la 1064 nm. Aceste valori sunt mai mari decât valorile subtipurii de aerosoli CALIPSO V4 pentru: fumul ridicat  $70 \pm 16$  (532 nm) și  $30 \pm 18$  (1064 nm); continental poluat/fum  $70 \pm 25$  (532 nm) și  $30 \pm 18$  (1064 nm) (Kim et al., 2018; Mereuță et al., 2022). Rapoartele inițiale ale lidar-ului au fost reduse cu 5% pe baza schemei descrise de (Young et al., 2018) pentru straturile opace de aerosoli. Aceste evenimente sunt descrise ca fiind rare (1% din toate straturile unice de aerosoli detectate în 2012; (Young et al., 2018)) și pot fi supuse unor incertitudini suplimentare. Valoarea inițială a raportului lidar (SP) este descrisă de (Young et al., 2018) în Ecuația (1) (Mereuță et al., 2022). Acest lucru presupune o valoare zero a transmitanței în

ambele direcții ( $TP2 = 0$ ) și o valoare a factorului de dispersie multiplă de 1 ( $\eta = 1$ ). Young et al., 2018 sugerează, de asemenea, că presupunerea  $\eta = 1$  poate să nu fie valabilă pentru straturile opace de aerosoli și poate introduce erori de bias (Mereuță et al., 2022). Aceste erori pot fi propagate prin recuperările de extincție și AOD și pot rezulta în estimări mai conservatoare. Raportul de depolarizare a particulei pentru pana de la Ra's Lanuf a fost de  $0.11 \pm 0.43$ , ceea ce corespunde unui fum moderat depolarizat (Kim et al., 2018; Mereuță et al., 2022). Figura 5c arată clasificarea elementelor atmosferice CALIPSO, în timp ce figura 5b arată rezultatele de clasificare a aerosolilor.

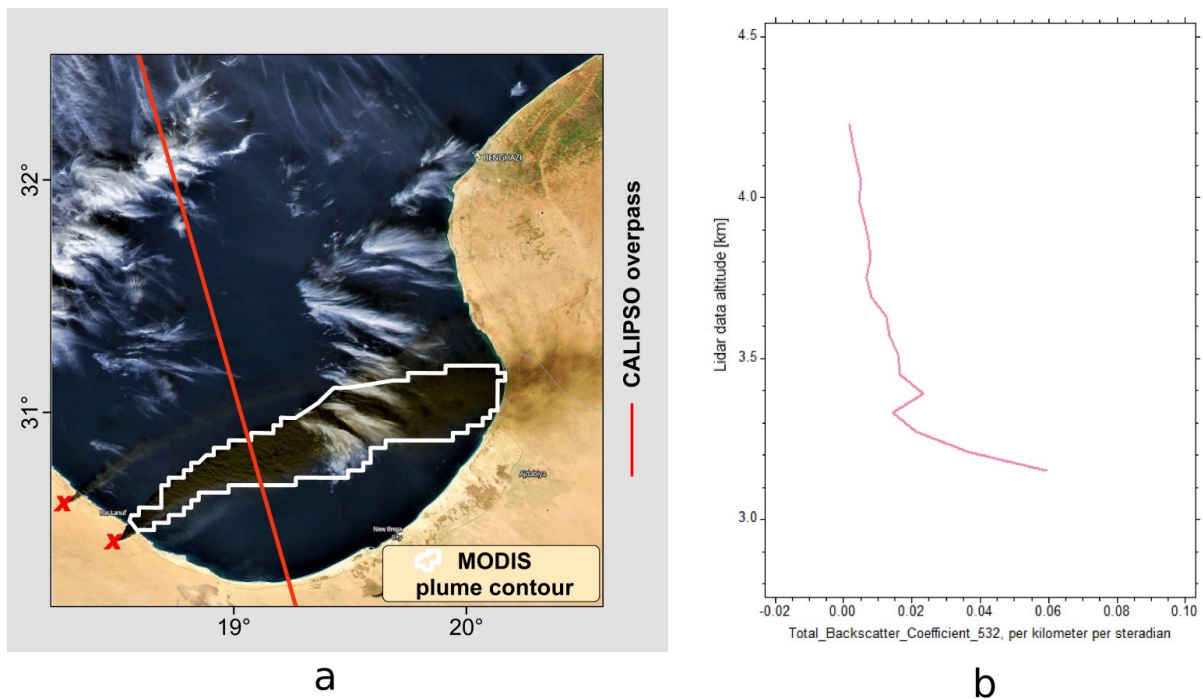
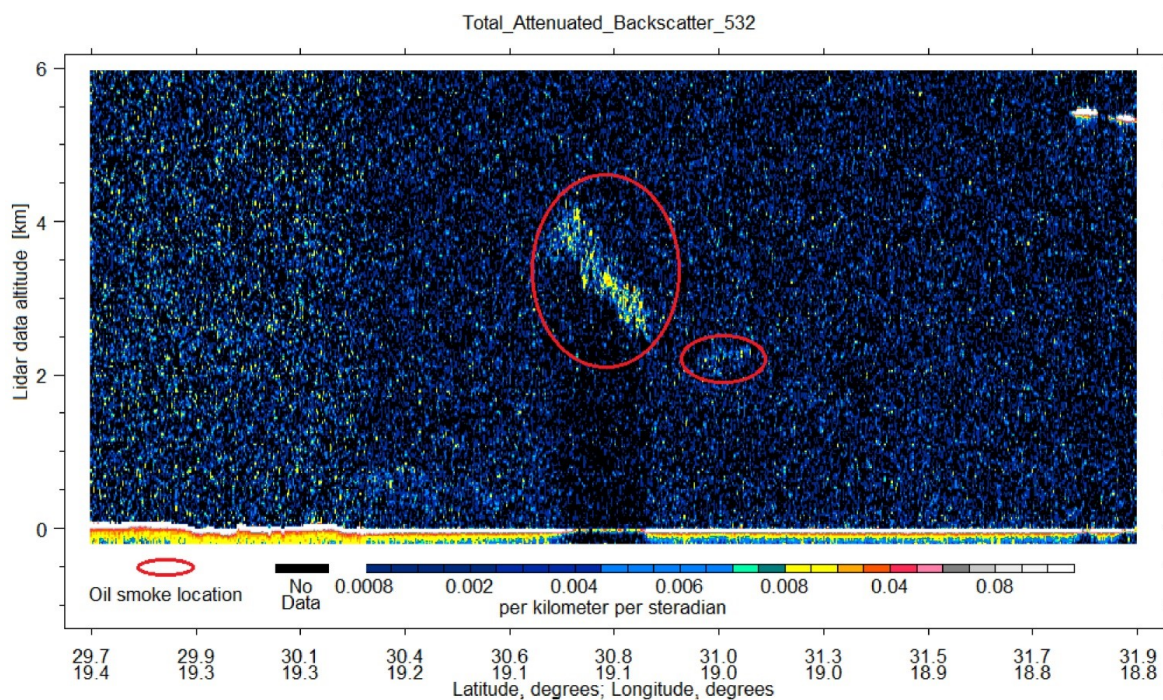
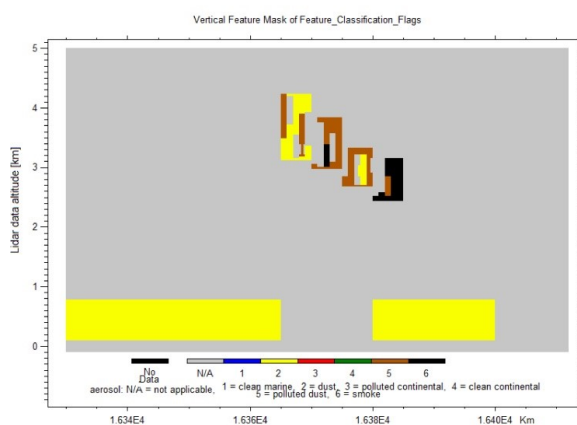


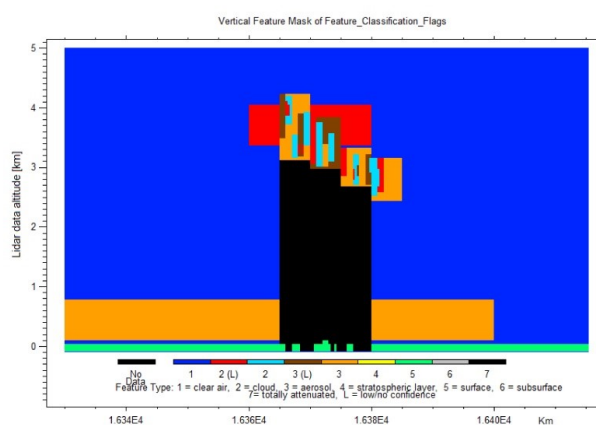
Figura 4 (a): Traiectoria de achiziție CALIPSO suprapusă peste achiziția; 7 (b): Profil de retroîmprăștiere pe particule CALIPSO nivel 2 (532 nm) Locația instalației afectată de incendiu este notată cu "X" în culoare roșie. (Imaginile satelitare RGB preluate și reprocesate din NASA Worldview, <https://worldview.earthdata.nasa.gov>).



a



b



c

Figura 5 (a) Reprezentarea grafică a secțiunii penei de fum din evenimentul 14 obținută pe baza Retroîmprăștierii totale atenuate CALIPSO (532 nm) vs Date de altitudine Lidar; (b) Clasificarea elementelor de tip aerosol; (c) Clasificarea elementelor de tip nor.

Pornind de la aceste imagini și de la scorul CAD mediu de -48, pana de fum este clasificată ca o caracteristică mixtă de nori și aerosoli. Acest lucru este de așteptat, deoarece vaporii de apă și particulele materiale sunt componente primare ale emisiilor de ardere a produselor petrochimice (Daum et al., 1993; Ferek et al., 1992; Mereuță et al., 2022). Formațiunile de nori deasupra fumului de petrol, cum ar fi pirocumulonimbus, au fost

observate în alte cazuri, așa cum se poate vedea în figura 6, un fenomen care împiedică achiziția de AOD atât în senzorii pasivi, cât și în cei activi.

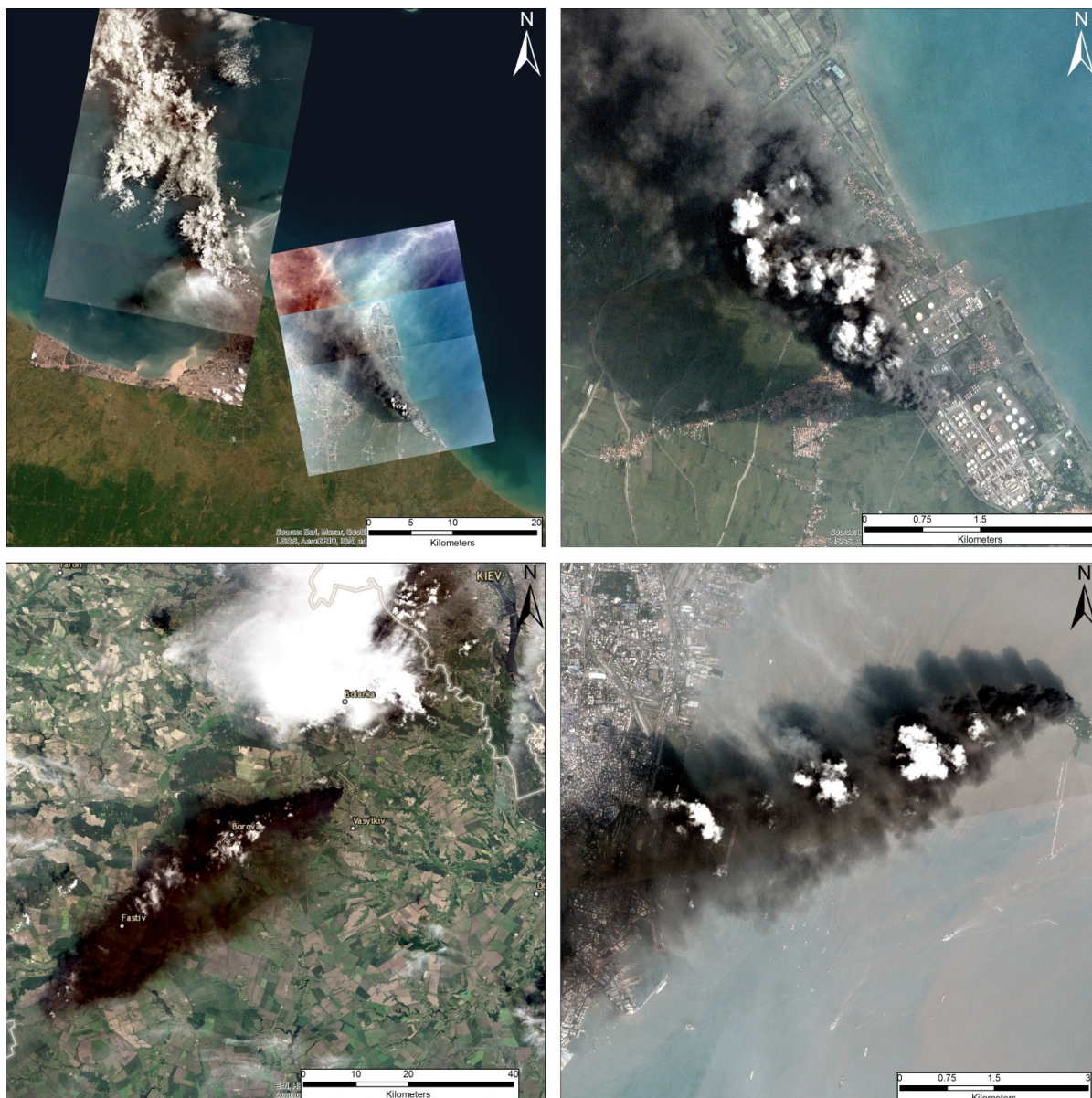


Figura 6. Formațiuni noroase deasupra penelor de fum petrochimic. Incendiul din Balogan, Indonesia, 29 martie, 2021 (sus). Incendiul din Vasytkiv, Ukraine, 9 iunie 2015 (stânga-jos); Incendiul din Butcher Island, India pe 7 octombrie, 2017 (dreapta-jos) (Mereuță et al., 2022) (Imagini satelitare RGB preluate și reprocesate din OpenStreetMap © OpenStreetMap contributors, 2021, distribuite de Open Data Commons Open Database License (ODbL) v1.0 și Planet Team, <https://www.planet.com/>).

Versiunea curentă a măștii verticale de caracteristici oferă un rezultat mixt pentru clasificarea aerosolilor formată din praf, praf poluat și aerosoli de fum pentru această pană. Valorile medii ale AOD-ului penei variază între  $1,52 \pm 0,8$  (532 nm) și  $1,43 \pm 0,47$  (1064 nm) (Mereuță et al., 2022). Am calculat, de asemenea, AE a penei (532/1064), cu o valoare de 0,09, indicând prezența particulelor grosiere.

## 5.2 Achiziții reușite MODIS

Rezultatele achizițiilor MODIS reușite sunt prezentate în tabelele 3 și 4 sub formă de valori medii și deviații standard. Achiziția MODIS Aqua prezentată în secțiunea 5.1 a fost în concordanță cu achiziția Terra. Evenimentul 14 a arătat o diferență mai mare în valorile AOD specifice penei între achizițiile Terra și Aqua. Cu toate acestea, acest lucru era de așteptat, deoarece incendiul s-a răspândit la mai multe rezervoare de petrol în timpul celor două achiziții. Bazându-ne pe aceste rezultate, nu am identificat discrepanțe semnificative între cei doi senzori (Mereuță et al., 2022). Pentru zona de pană și AOD-ul specific penei, majoritatea valorilor se încadrează în intervalul de incertitudine așteptat al algoritmului de achiziție,  $\pm (0.05 + 0.20 \times \text{AOD})$  atunci când comparăm între cei doi senzori (Gupta et al., 2018). Schimbările mici în valorile AOD pot fi atribuite și dispersiei penelor. Pentru majoritatea cazurilor, AOD specific penei este principalul contribuitor la AOD-ul total în coloana atmosferică, cu toate acestea, toate valorile AOD sunt în general scăzute. În cazurile în care AOD-ul de fundal este deja scăzut, un strat subțire de fum negru poate reduce transmisitanța atmosferică și valorile de radianță. Acest efect ar conduce la valori mai mici ale reflectanței TOA și ale AOD-ului specific penei (Mereuță et al., 2022).

Tabelul 3. Proprietățile aerosolilor (AOD, AE, R<sub>eff</sub>), valorii medii și deviația standard, obținute pe baza achizițiilor reușite MODIS Terra

<b>Nr. eveniment</b>	<b>Data</b>	<b>AOD total până</b>	<b>AOD fond local</b>	<b>AOD (specific penei)</b>	<b>AE până</b>	<b>AE fond local</b>	<b>R<sub>eff</sub> până (μm)</b>	<b>R<sub>eff</sub> fond local</b>
<b>4</b>	08.12.2015	0.19; 0.04	0.06; 0.01	0.13; 0.04	1.25; 0.18	1.59; 0.44	0.47; 0.06	0.29; 0.23
<b>5</b>	21.04.2010	0.25; 0.03	0.20; 0.02	0.05; 0.03	0.34; 0.25	1.17; 0.30	0.61; 0.14	0.26; 0.05
<b>9</b>	11.03.2011	0.29; 0.05	0.13; 0.05	0.16; 0.05	0.43; 0.30	1.64; 0.61	0.65; 0.19	0.22; 0.10
	28.12.2014	0.22; 0.05	0.07; 0.02	0.15; 0.05	-0.07; 0.15	0.68; 0.33	1.19; 0.22	0.49; 0.14
<b>13</b>	29.12.2014	0.13; 0.02	0.05; 0.004	0.08; 0.02	-0.03; 0.06	0.52; 0.12	1.03; 0.16	0.79; 0.10
	30.12.2014	0.18; 0.03	0.15; 0.08	0.03; 0.07	-0.11; 0.10	0.08; 0.14	1.48; 0.31	0.80; 0.15
<b>14</b>	06.01.2016	0.12; 0.02	0.02; 0.005	0.10; 0.02	-0.18; 0.002	0.45; 0.38	1.45; 0.02	0.51; 0.16
<b>16</b>	21.01.2016	0.21; 0.03	0.07; 0.02	0.14; 0.03	-0.13; 0.09	1.20; 0.33	1.34; 0.29	0.36; 0.12
<b>20</b>	19.08.2016	0.24; 0.03	0.19; 0.04	0.05; 0.03	0.06; 0.16	0.41; 0.20	0.87; 0.12	0.61; 0.10

Tabelul 4. Proprietățile aerosolilor (AOD, AE, R<sub>eff</sub>), valorii medii și deviația standard, obținute pe baza achizițiilor reușite MODIS Aqua

<b>Nr. eveniment</b>	<b>Data</b>	<b>AOD total până</b>	<b>AOD fond local</b>	<b>AOD (specific penei)</b>	<b>AE până</b>	<b>AE fond local</b>	<b>R<sub>eff</sub> până (μm)</b>	<b>R<sub>eff</sub> fond local</b>
<b>4</b>	08.12.2015	0.14; 0.03	0.03; 0.01	0.11; 0.03	0.96; 0.35	1.28; 0.34	0.29; 0.06	0.28; 0.14
<b>5</b>	21.04.2010	0.23; 0.03	0.16; 0.02	0.07; 0.03	0.74; 0.27	1.41; 0.24	0.38; 0.13	0.26; 0.06
<b>9</b>	11.03.2011	0.24; 0.04	0.14; 0.03	0.10; 0.04	0.50; 0.19	0.85; 0.21	0.57; 0.13	0.36; 0.09
	28.12.2014	0.11; 0.02	0.05; 0.01	0.06; 0.02	-0.13; 0.15	0.01; 0.18	1.44; 0.05	1.04; 0.16
<b>13</b>	29.12.2014	0.15; 0.05	0.07; 0.03	0.08; 0.05	-0.06; 0.15	0.52; 0.30	1.73; 0.45	0.70; 0.17
	30.12.2014	0.13; 0.04	0.16; 0.04	-0.03; 0.03	-0.11; 0.11	0.09; 0.14	1.37; 0.12	0.89; 0.13
<b>14</b>	06.01.2016	0.21; 0.05	0.08; 0.04	0.13; 0.05	-0.14; 0.08	0.38; 0.39	1.64; 0.37	0.68; 0.22
<b>16</b>	21.01.2016	0.15; 0.02	0.05; 0.01	0.10; 0.02	-0.15; 0.07	0.79; 0.21	1.38; 0.16	0.32; 0.07
<b>20</b>	19.08.2016	0.09; 0.01	0.12; 0.03	-0.03; 0.01	-0.01; 0.19	0.31; 0.34	1.17; 1.29	0.71; 0.20
<b>21</b>	04.01.2018	0.75; 0.09	0.79; 0.07	-0.04; 0.09	0.78; 0.29	0.67; 0.23	0.58; 0.14	0.54; 0.14

## 5.4 Achiziții CALIPSO

În decursul perioadei de 12 ani am identificat trei evenimente în Golful Sidra, evenimentele 11, 13 și 14. Cu excepția evenimentului 14, descris anterior în secțiunea 5.1, toate achizițiile CALIPSO au fost neconstrânse (Mereuță et al., 2022). Rezultate specifice penelor de fum sunt prezentate în tabelele 5 – 7.

Pe baza măsurătorilor CALIPSO, coeficientul de împrăștiere și extincție a fumului a variat între 2 și 9 ori mai mare decât nivelurile de fond. În patru din cele șase cazuri, raportul de depolarizare a particulelor a relevat valori cuprinse între 0,11 și 0,15, asemănătoare cu fumul moderat depolarizant, în timp ce valorile mai mari din două cazuri au fost determinate în mare parte de prezența particulelor de praf în scena atmosferică locală (Mereuță et al., 2022). Cu excepția unui caz, toate rapoartele lidar au fost obținute prin achiziții neconstrânse, deoarece pana a fost situată în PBL (Mereuță et al., 2022). Caracteristica opacă a măsurat rapoarte lidar ridicate de  $109 \pm 47$  sr (532 nm) și  $86 \pm 10$  sr (1064 nm), asemănătoare cu raportul lidar al fumului găsit în literatura de specialitate (Haarig et al., 2018; Mereuță et al., 2022). Suspectăm că aceste valori sunt un indicator bun pentru natura puternic absorbantă a luminii specifică acestor aerosoli. Scorurile medii CAD au variat de la -46 la -99, ceea ce ar indica o încredere puternică în prezența aerosolilor. Algoritmul de clasificare a caracteristicilor a indicat prezența unor nori mici în 3 din cele 6 cazuri, sugerând caracteristici mixte nor-aerosol (Mereuță et al., 2022). Valorile AE au fost constant scăzute în toate cazurile, sugerând prezența de particule de fum mai mari în secțiunile transversale ale penelor de fum. Valorile AOD măsurate între 0,02 și 1,52 au fost direct influențate de ratele de ardere a combustibilului, încărcarea locală de aerosoli în fundal și în special de soluțiile de raport lidar (Mereuță et al., 2022). Fumul din evenimentul 14 a fost identificat deasupra PBL până la 4200 m. Acest lucru este un bun indicator pentru magnitudinea evenimentului, deoarece a implicat mai multe incendii de rezervoare cu rate de ardere semnificative care au injectat simultan concentrații importante de aerosoli la mare altitudine în troposferă (Mereuță et al., 2022). Pe baza acestui număr mic de evenimente, este dificil să se atribuie o clasă separată de



aerosoli pentru aceste pene de fum de petrol. Cu toate acestea, informații valoroase privind distribuțiile de dimensiuni, raportul de depolarizare a particulelor și, într-o oarecare măsură, raportul lidar pot fi reținute din acest studiu (Mereuță et al., 2022). Trebuie menționat că aceste valori reflectă pene de fum situate foarte aproape de sursele de incendiu și, prin urmare, prezintă rapoarte de amestec reduse cu alte tipuri de aerosoli prezenți în fondul atmosferic local (Mereuță et al., 2022).

Tabelul 5. Retroîmprăștierea și extincția particulelor de fum petrochimic obținute prin măsurători lidar CALIPSO

Nr. eveniment	Dată	Retroîmprăștierea pe particulă (pană)						(fond local)	
		medie 532	STDEV 532	STER 532	medie 1064	STDEV 1064	STER 1064	medie 532	medie 1064
1	01.07.2016	0.006	0.003	0.0004	0.005	0.002	0.0004	0.002	0.001
	17.07.2016	0.007	0.002	0.0004	0.007	0.004	0.0008	0.002	0.002
	21.10.2016	0.014	0.011	0.003	0.014	0.012	0.003	0.003	0.004
11	22.08.2008	0.007	0.004	0.0006	0.008	0.005	0.0007	0.001	0.0009
13	29.12.2014	0.002	0.001	0.0005	0.002	0.001	0.0007	0.0009	0.001
14	06.01.2016	0.015	0.016	0.002	0.017	0.016	0.002	-	-
Nr. eveniment	Dată	Coeficientul de extincție (pană)						(fond local)	
		medie 532	STDEV 532	STER 532	medie 1064	STDEV 1064	STER 1064	medie 532	medie 1064
1	01.07.2016	0.312	0.155	0.022	0.238	0.129	0.018	0.116	0.090
	17.07.2016	0.314	0.122	0.021	0.320	0.212	0.037	0.131	0.089
	21.10.2016	0.733	0.621	0.179	0.662	0.567	0.163	0.175	0.180
11	22.08.2008	0.435	0.253	0.035	0.419	0.264	0.037	0.076	0.046
13	29.12.2014	0.105	0.043	0.021	0.099	0.055	0.027	0.045	0.035
14	06.01.2016	1.659	1.823	0.268	1.554	1.588	0.234	-	-

Tabelul 6. Proprietățile aerosolilor specifice lidar (PDR – particulate depolarization ratio; Lidar ratio) și incertitudinile asociate, obținute din măsuratori CALIPSO.

Nr. eveniment	Data	PDR 532 nm (pană)	PDR 532 nm (fond)	Raport Lidar 532 nm (pană)	Raport Lidar 1064 nm (pană)
<b>1</b>	01.07.2016	0.27 ± 0.30	0.25 ± 0.70	44 ± 9	44 ± 13
	17.07.2016	0.32 ± 0.48	0.19 ± 0.43	44 ± 9	44 ± 13
	21.10.2016	0.15 ± 0.24	0.22 ± 0.47	49 ± 15	46 ± 19
<b>11</b>	22.08.2008	0.11 ± 0.18	0.17 ± 0.35	55 ± 22	48 ± 24
<b>13</b>	29.12.2014	0.12 ± 0.14	0.12 ± 0.25	37 ± 15	37 ± 15
<b>14</b>	06.01.2016	0.11 ± 0.43	-	109 ± 47	86 ± 10

Tabelul 7. Proprietățile optice ale aerosolilor obținute din măsurători CALIPSO.

Nr. Eveniment	Data	AOD 532 (pană)	AOD 532 (fond)	AOD 1064 (pană)	AOD 1064 (fond)	AE 532/1064 (pană)	AE 532/1064 (fond)	Lungime secțiune (5 km)	Înălțime secțiune (0.06 km)
<b>1</b>	01.07.2016	0.046 ± 0.010	0.017 ± 0.005	0.035 ± 0.014	0.013 ± 0.007	0.39	0.38	100	0.150
	17.07.2016	0.084 ± 0.019	0.035 ± 0.007	0.086 ± 0.038	0.024 ± 0.01	-0.03	0.54	35	0.274
	21.10.2016	0.088 ± 0.029	0.021 ± 0.006	0.079 ± 0.038	0.021 ± 0.01	0.15	0.03	30	0.120
<b>11</b>	22.08.2008	0.163 ± 0.066	0.028 ± 0.012	0.157 ± 0.08	0.017 ± 0.009	0.05	0.71	40	0.375
<b>13</b>	29.12.2014	0.025 ± 0.010	0.008 ± 0.003	0.023 ± 0.017	0.010 ± 0.06	0.12	-0.32	5	0.240
<b>14</b>	06.01.2016	1.526 ± 0.804	Aer curat	1.430 ± 0.473	Aer curat	0.09	Aer curat	15	0.920

## 5.5 Studiu de caz AERONET

Un singur studiu a fost identificat în literatura științifică (Mather et al., 2007) în care s-au măsurat proprietățile aerosolului din incendiul de la Bouncefield în două locații distincte. Cu toate acestea, am identificat pana de fum, evenimentul 10, rezultat în urma incendiilor de rezervoare naftă din Vasylkiv, Regiunea Kiev, Ucraina, pe 9 iunie 2015. Fumul fost capturată și în imagini RGB, așa cum se vede în figura 6. Figura 7a prezintă o semnătură distinctă pentru pana de fum, deoarece valorile AOD au crescut semnificativ în toate lungimile de undă măsurate (Mereuță et al., 2022). Figura 7c este o bună indicație a mărimii particulelor. Din mediile lunare distingem, valorile AE ce au scăzut semnificativ în ziua evenimentului (Mereuță et al., 2022). Figura 7d prezintă valorile AE cuprinse între 0,45 și 0,9, corespunzând intervalului de timp în care a fost observată pana. Figura 7b arată valorile AOD în creștere pe măsură ce fumul s-a îndreptat spre NE de Kiev. Stația AERONET din Kiev este situată la aproximativ 35 km NE de depozitul de rezervoare din Vasylkiv (Mereuță et al., 2022). Din figura 7b, se poate observa că masa principală de fum a fost detectat la 9:45 UTC. În acel moment, măsurătorile au arătat valori AOD de 0.68 la 500 nm. Din păcate, nu au fost disponibile produse de inversare care să coincidă cu măsurători directe solare, deoarece cerul deasupra Kiev a fost parțial noros în acea perioadă.

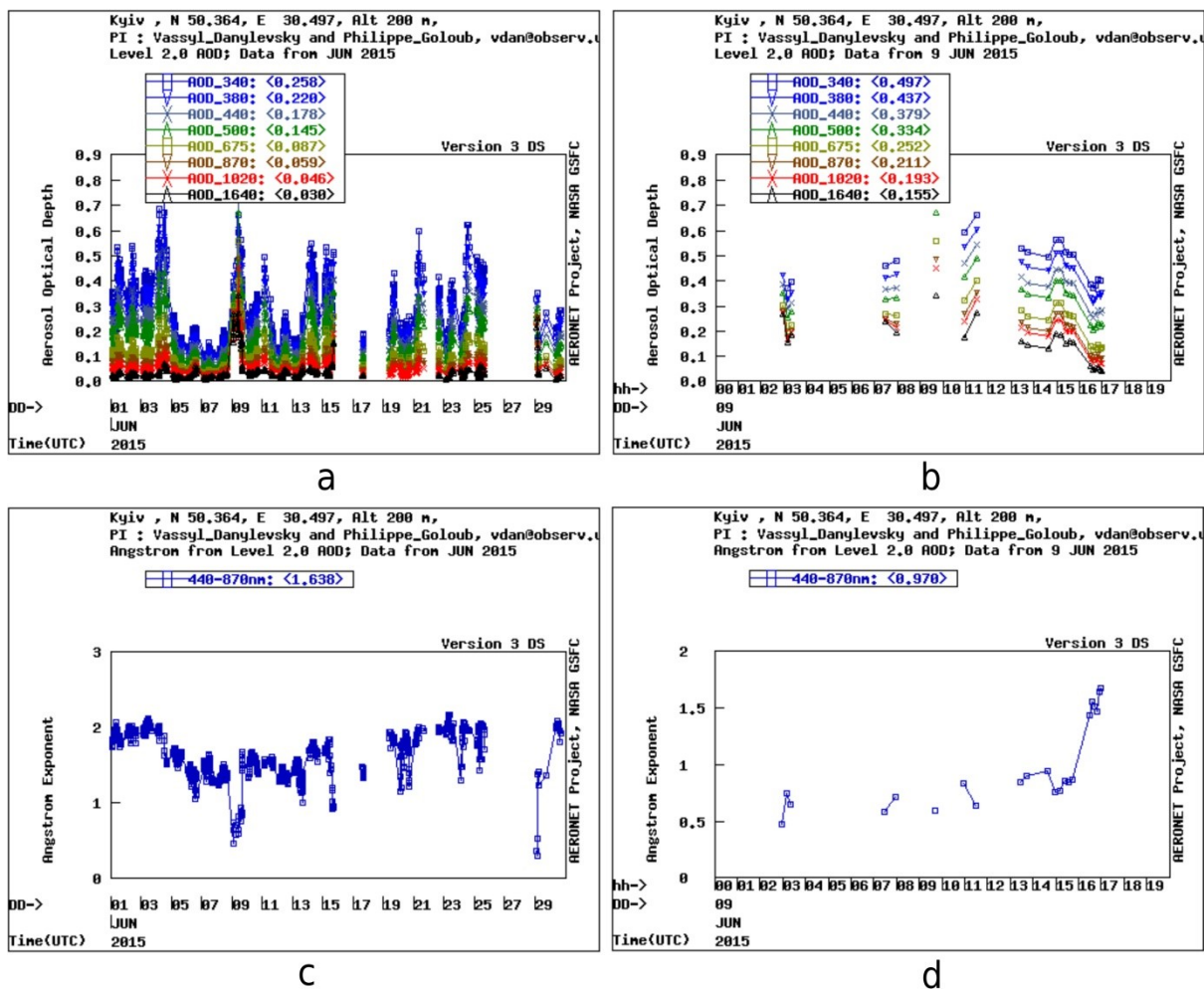


Figura 7. AOD și AE din zona Kiev la data de 09.06.2015 vs valorile medii din iunie 2015 (Mereuță et al., 2022)

## 5.6 Discuții și studii similare

Rezultatele prezentate în acest studiu arată o gamă largă de valori atribuite unei multitudini de factori locali, cum ar fi aerosolii de fond, rata de ardere, condițiile meteorologice, tipul de combustibil, momentul de achiziție și geografia locală. Alți factori pot fi atribuiți diferitelor tipuri de metode și algoritmi utilizați pentru a obține date specifice aerosolilor (Mereuță et al., 2022). Datele MODIS au arătat valori relativ scăzute ale AOD specifice penelor, care variau între  $-0,04 \pm 0,04$  și  $0,16 \pm 0,08$ . Singurul eveniment care a fost capturat de ambele achiziții MODIS și CALIPSO, într-un interval de timp de 2 minute, a arătat un nivel mare de discrepanță (Mereuță et al., 2022). În mod particular, evenimentul 14

a arătat valori medii ale AOD-ului coloanei de  $0,21 \pm 0,09$  peste zona penei, cu o valoare maximă a pixelului de  $0,32 \pm 0,11$  (550 nm) (Mereuță et al., 2022). În contrast, măsurătorile CALIPSO au arătat o valoare medie a AOD-ului penei de  $1,52 \pm 0,8$  (532 nm), fiind totodată valori specifice, deoarece nu au fost detectate alte valori ale extincției sub sau deasupra penei din troposferă în scena atmosferică (Mereuță et al., 2022). În celelalte 5 cazuri, valorile AOD achiziționate de CALIPSO au variat între  $0,02 \pm 0,01$  și  $0,16 \pm 0,06$  pentru o grosime medie a penei cuprinsă între 0,120 și 0,375 km (Mereuță et al., 2022). În timp ce aceste valori mai asemănătoare cu achizițiile reușite MODIS, o comparație directă ar trebui evitată. Unul dintre motivele posibile este că MODIS nu a achiziționat cu succes valorile AOD peste uscat, astfel încât nu se poate face o comparație directă cu CALIPSO pentru evenimentele 1 și 11 (Mereuță et al., 2022). Achizițiile MODIS de la evenimentul 13 din 28 și 29 decembrie 2014 au fost făcute la aproximativ 12 ore distanță față de cele din CALIPSO. Ambii senzori au fost de acord cu valori reduse ale AOD pentru penele de fum în cauză. Nivelurile ridicate de incertitudine privind valorile LUT MODIS și soluțiile de lidar neconstrânse CALIPSO sugerează necesitatea unei analize mai detaliate (Mereuță et al., 2022). Singurul caz observat cu un fotometru solar AERONET (evenimentul 10) indică valori AOD cuprinse între 0,28 și  $0,68 \pm 0,01$  (500 nm), însă imaginile satelit sugerează că aceste valori nu au fost relevante pentru pană principală, care cel mai probabil nu a ajuns la Kiev. Cu toate acestea, MODIS nu a achiziționat cu succes nicio valoare AOD pentru acest eveniment sau pentru orice altul deasupra uscatului, în timp ce pentru alte evenimente deasupra oceanului nu a furnizat valori AOD atât de mari (Mereuță et al., 2022). Putem deduce astfel că AOD-ul din MODIS specific penelor de fum petrochimic nu pot produce rezultate satisfăcătoare, deoarece valorile LUT predefinite nu conțin evenimente similare cu cele descrise în acest studiu.

Măsurătorile AOD CALIPSO sunt influențate direct de raportul de lidar. Pentru evenimentele achiziționate de CALIPSO, o estimare corectă a raportului de lidar este foarte dificil de obținut bazat pe soluții neconstrânse. Pe de o parte, aceste rapoarte lidar nu sunt măsurate direct (Mereuță et al., 2022). Pe de altă parte, raportul de lidar pentru penele de fum poate prezenta un comportament diferit, având în vedere conținutul mare de BC, diferit de

fumul de biomasa sau aerosolii continentali poluați cu fum. În cazurile de condiții atmosferice "curate", o soluție constrânsă poate duce la o mai bună estimare a valorilor AOD (Mereuță et al., 2022). Cu toate acestea, aceste condiții sunt rar întâlnite, cu mai puțin de 0,01% din toate straturile de aerosoli detectate (Tackett et al., 2018). În cazul în care rapoartele lidar sunt estimate direct (evenimentul nr. 14), incertitudinile referitoare la straturile opace de aerosoli fac dificil de evaluat dacă valorile AOD sunt supraestimate sau subestimate (Mereuță et al., 2022). Valorile AE par să fie mai consistente între MODIS, CALIPSO și AERONET, deoarece toate tehnicile sugerează prezența de amestecuri de aerosoli grosieri; cu toate acestea, în condiții cu valori scăzute de AOD, ar trebui să evităm comparațiile directe cu ceilalți senzori (Mereuță et al., 2022).

Tabelul 8 prezintă proprietățile optice ale fumului petrochimic din diferite studii care au utilizat tehnici similare de măsurare la sol sau din platforme aeropurtate. În general, estimările AOD ale MODIS sunt foarte mici în comparație cu studiile de referință prezentate în tabelul 8 (Mereuță et al., 2022). Trebuie menționat faptul că valorile AOD ale penelor fum din timpul Războiului din Golf sunt mai mari în mare parte datorită magnitudinii evenimentului. Aceste măsurători descriu pene-super compozite rezultate dintr-un număr mare de incendii de puțuri, sonde și depozite petroliere (Mereuță et al., 2022).

Tabelul 8. Proprietățile optice ale fumului petrochimic obținute pe baza măsurătorilor de la sol sau aeropurtate (din literatura de specialitate).

Referințe	AOD 532 nm	AOD 1064 nm	LIDAR			
			AE 550/1064 nm	PDR 532 nm	LR 532 nm (sr)	LR 1064 nm (sr)
<b>Acest studiu CALIPSO</b>	0.025 ± 0.010 – 1.526 ± 0.804	0.023 ± 0.017 - 1.430 ± 0.473	- 0.03 – 0.39	0.11 ± 0.43 - 0.32 ± 0.48	37 ± 15 - 109 ± 47	37 ± 15 - 86 ± 10
<b>(Okada et al. 1992) Lidar la sol</b>	-	-	-	0.14 – 0.18	-	-
<b>(Ross et al. 1996) Lidar aeropurtat</b>	0.2 - 0.6	-	-	-	38	-
<b>(Laursen et al. 1992) Lidar aeropurtat</b>	0.05 – 1 ± 65%	0.05 – 1.2 ± 85%	-	-	-	-
<b>(Ceolato et al. 2020) Lidar la sol</b>	-	-	-	0.058	-	-
<b>(Ceolato et al. 2021) Lidar la sol</b>	-	-	-	-	125.3 ± 5.0 sr	-



Referințe	Radiometru			Fotometru solar		
	AOD 550 nm	AE 550/860 nm	R <sub>eff</sub> (μm)	AOD 500 nm	AE 440/870 nm	R <sub>eff</sub> (μm)
<b>Acest studiu MODIS și AERONET</b>	- 0.04 – 0.16 ±(0.05 + 0.20 × AOD)	- 0.18 – 1.25	0.29 – 1.73 μm	0.28 – 0.68 ± 0.01	0.45 – 0.90	-
<b>(Pilewskie and Valero 1992) Radiometru aeropurtat</b>	0.82 – 1.92 ± 2% (500 nm)	-	-	-	-	-
<b>(Nakajima et al. 1996)</b>	-	-	-	1.5	0.7 ± 2.5 %	-
<b>(Mather et al. 2007)</b>				0.3 – 1.6 (440 nm)	0.09 – 0.42	0.45 – 1.40 μm

## 6. Concentrații PM 2.5 și harta hazardului

Din observațiile precedente putem deduce limitările algoritmilor de achiziție AOD MODIS în cazul penelor de fum petrochimic. De asemenea, datele MODIS sunt folosite direct de către modelul MERRA pentru reanaliza și estimarea AOD-ului în zonele de referință. Astfel datele CALIPSO sunt preferate în cazul estimărilor de PM2.5.

Modelul MERRA-2 prezintă o corelație ridicată între valorile AOD și PM2.5 observată pentru zona atmosferică de fond,  $R^2 = 0.9$ . Însă, corelația scade,  $R^2 = 0.67$ , în ceea ce privește valorile specifice penelor de fum ceea ce denotă limitările algoritmilor de achiziție AOD satelitare ce utilizează senzorii pasivi. Figura 8 reprezintă valorile corelate (pixel vs pixel) de AOD și PM2.5 din datele MERRA-2 pentru penele de fum specifice evenimentelor din zona Libiei.

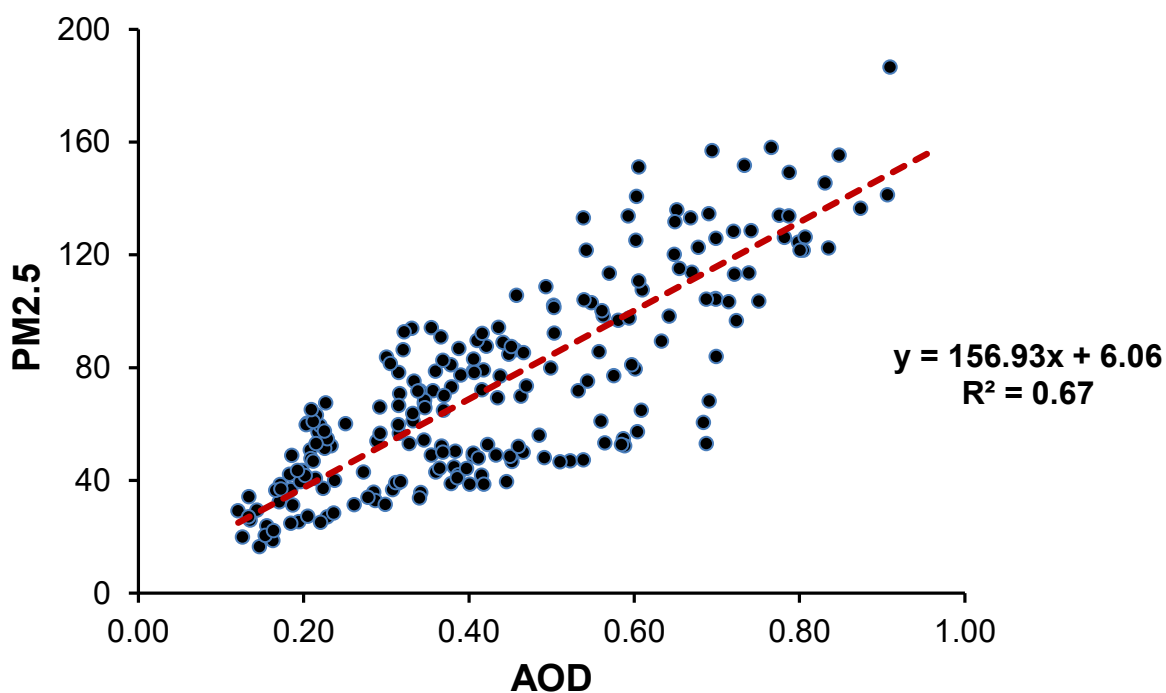


Figura 8. Corelația dintre valorile de PM2.5 și AOD extrase din MERRA-2 pentru evenimentele din Libia

MERRA-2 estimează o medie AOD de 0.43 ce se situează deasupra mediilor MODIS, 0.23 și sub media CALIPSO de 1.52. Din observațiile empirice obținute în urma acestui studiu AOD-ul specific penelor de fum prezintă valori între 2 și 6 (în funcție de specificul evenimentului și sensorul utilizat) ori mai mari decât fondul atmosferic. Astfel am aplicat un factor de corecție valorilor AOD din CALIPSO pentru a reflecta acest raport prezent atât în cazul măsurătorilor MODIS cât și pentru măsurătorile CALIPSO. Media AOD CALIPSO devine 1.01, iar concentrația medie estimată de PM<sub>2.5</sub> devine 173 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Distribuția spațială a acestor valori atribuită dimensiunii pixelilor AOD MODIS este prezentată în figura 9.

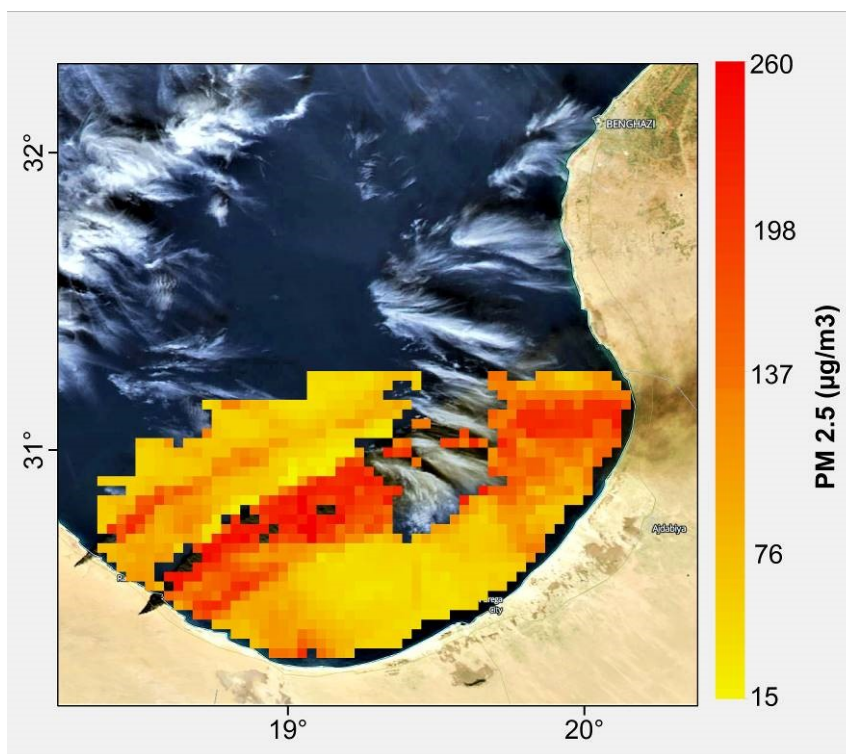


Figura 9. Concentrația de PM<sub>2.5</sub> estimată pentru evenimentul din Golful Sidra, 06.10.2016

Valorile de PM<sub>2.5</sub> se regăesc în intervalul 15 – 263  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , cu valorile cele mai ridicate constrânse în apropierea sursei și în centrul penei de fum. În ceea ce privește datele MERRA-2 acestea au fost mediate pe toată perioada evenimentului observat, anume 5 – 7 ianuarie 2016. În această perioadă MODIS a efectuat 2 achiziții în timp ce CALIPSO a

efectuat o achiziție. Astfel, valorile PM2.5 nu pot fii considerate ca medii zilnice sau orare, ele reflectând estimările pe 3 zile din reanaliza MERRA – 2 corectate de o achiziție constrânsă.

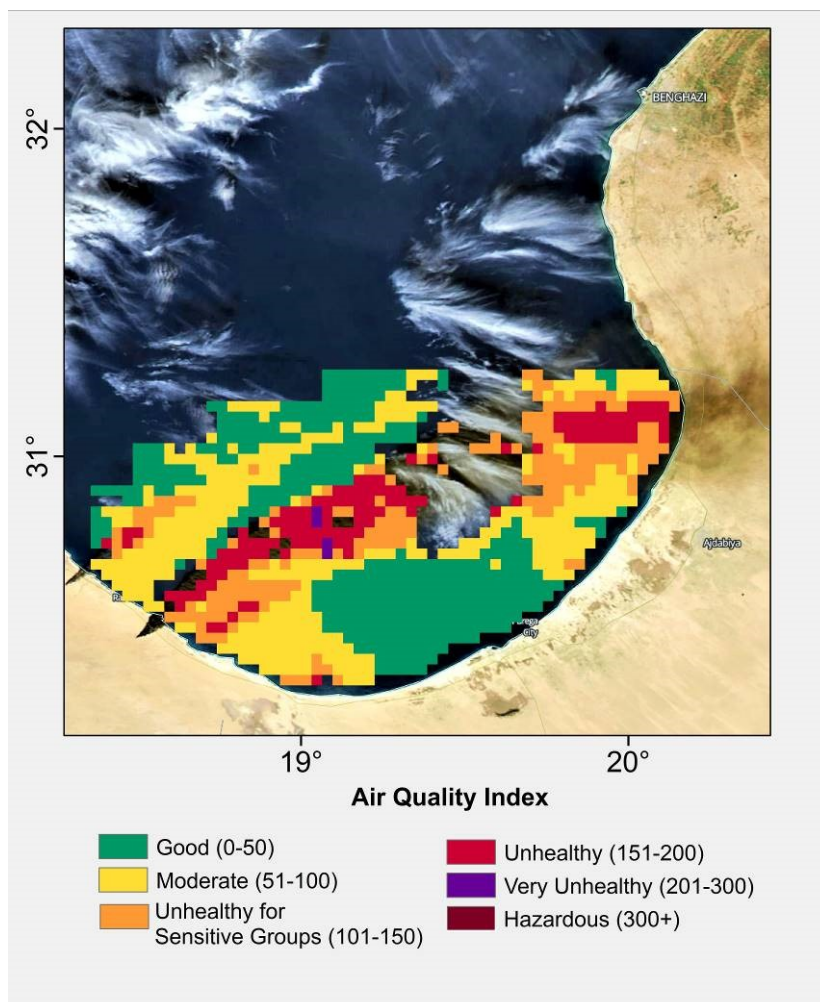


Figura 10. Indicele de calitate a aerului (EPA) calculat pe baza estimărilor de PM2.5 pentru evenimentul din Golful Sidra, 06.10.2016

În figura 10 se poate observa o suprafață semnificativă de influență unde calitatea aerului scade și este considerat nesănătoasă. Ținând cont de incertitudinea din achiziția AOD-ului CALIPSO precum și factorul de corecție aplicat, aceste intervale au un caracter calitativ cu un anumit grad conservativ. Pentru a obține estimări cât mai apropiate de realitate este nevoie de reducerea incertitudinilor din achizițiile satelitare precum și introducerea unor

constrângeri specifice în modele de reanaliză. Harta de hazard obținută în acest studiu prezintă rezultate promițătoare pentru utilizarea observațiilor sinergice satelitare în evaluarea riscurilor asociate cu penele de fum petrochimic.

## 7. Concluzii

În acest studiu am examinat penele de fum de la 30 de evenimente industriale majore într-un interval de 12 ani. Din cunoștințele noastre, acesta este primul studiu care utilizează o abordare sinergică bazată pe tehnici de teledetecție prin satelit (Mereuță et al., 2022). Algoritmul MODIS peste ocean a achiziționat cu succes proprietățile aerosolilor în 10 cazuri, variind în medie de la -0,06 la 0,16 pentru AOD-ul specific penei, -0,18 la 1,25 pentru exponentul Angstrom și 0,29 la 1,73  $\mu\text{m}$  pentru raza efectivă. Cu excepția evenimentului 4, toate penele de fum au prezentat valori de AE mai mici de 0,74, sugerând că particulele de fum sunt în principal dominate de modul grosier. Măsurătorile CALIPSO au arătat valori ale AOD-ului penei care variau de la 0,02 la 0,16 (532 nm) și de la 0,02 la 0,15 (1064 nm), cu excepția unui eveniment în care valorile AOD-ului au ajuns la 1,52 (532 nm) și 1,43 (1064 nm) (Mereuță et al., 2022). Valorile AE au variat de la -0,03 la 0,39, ceea ce este în acord cu MODIS. S-a constatat o discrepanță mare în cazul evenimentului 14, unde valorile AOD-ului CALIPSO erau de 5 ori mai mari decât cele MODIS. Pentru acest eveniment specific, CALIPSO a achiziționat rapoarte lidar mari de  $109 \pm 47$  (532 nm) și  $86 \pm 10$  sr (1064 nm) pe baza unei scheme de achiziționare constrânse pentru straturile opace de aerosoli (Mereuță et al., 2022). Concentrația mare de vapori de apă emisă de incendiul de petrol ar fi putut contribui la apariția unor formațiuni de nori mici deasupra penei de fum și, astfel, la contaminarea achizițiilor. De obicei, raportul lidar a variat de la 37 la 55 sr (532 nm) și de la 37 la 48 sr (1064 nm), cu toate acestea, aceste soluții neconstrânse au indicat valori specifice scenei locale de aerosoli. Valorile coeficientului de extincție a particulelor au variat între 0,10 și  $1,65 \text{ km}^{-1}$  (532 nm) și între 0,10 și  $1,55 \text{ km}^{-1}$  (1064 nm). În medie, valorile de retroîmprăștiere și coeficientul de extincție au fost de 2 până la 9 ori mai mari decât fondul

local (Mereuță et al., 2022). Rapoartele de depolarizare a particulelor au variat între 0,11 și 0,15 pentru patru din șase cazuri, în timp ce celelalte cazuri au produs valori mai ridicate de 0,27 și 0,32. Suspectăm că această discrepanță în cele două cazuri la Qayyara este rezultatul aerosolilor de praf prezenți în fondul atmosferic local. Valorile prezentate sunt în acord cu studii similare care au utilizat măsurători terestre și aeriene (Mereuță et al., 2022). Credem că MODIS oferă o estimare conservatoare a AOD-ului specific penelor, deoarece algoritmi MODIS se bazează pe modele generale de aerosoli și diverse condiții atmosferice din tabelele de căutare, care nu reflectă natura absorbantă a luminii a acestor pene de fum. În plus, relația spectrală de reflectanță utilizată de algoritmi MODIS poate împiedica majoritatea încercărilor de achiziție, deoarece penele de fum cu conținut ridicat de BC prezintă o semnătură spectrală distinctă. Măsurătorile CALIPSO depind foarte mult de soluții lidar neconstrânse, care la rândul lor nu reflectă realitatea penelor de fum (Mereuță et al., 2022). Prin urmare, credem că valorile AOD bazate pe măsurătorile CALIPSO sunt de natură conservatoare, deoarece fumul cu proprietăți puternic absorbante în VIS ar produce rapoarte mai mari ale lidarului și valori AOD. În general, achizițiile constrânse ar reflecta mai bine proprietățile reale ale fumului, deoarece acestea nu se bazează pe o atribuire ad-hoc a raportului lidar. Cu toate acestea, atribuirea unei recuperări constrânse la penele de fum petrochimic necesită ca 1: pana să fie înconjurată de aer curat; și 2: concentrațiile de fum nu ar trebui să depășească un prag în care se realizează o atenuare totală (Mereuță et al., 2022). De asemenea magnitudinea evenimentului este un factor important deoarece penele de fum trebuie să atingă temperatura necesară pentru a străpunge PBL-ul. Raporturile lidar generate din evenimentul 14 reprezintă o ocazie extrem de rară în care penele de fum au fost tratate ca un strat de aerosoli opac. Ca atare, a fost dificil să evaluăm dacă raporturile lidar sunt supraestimate sau subestimate, deși credem că această soluție actuală este încă preferabilă soluțiilor neconstrânse (Mereuță et al., 2022). Subliniem necesitatea de a efectua măsurători lidar suplimentare ale penelor de fum, deoarece, pe baza acestui studiu, nu putem concluziona dacă acești aerosoli aparțin unui subtip de fum distinct. Misiunile viitoare cu lidar în orbită, cum ar fi EarthCare (Illingworth et al., 2015), vor oferi măsurători directe ale rapoartelor

lidar și posibilitatea de estimări mai bune ale AOD în ceea ce privește aceste tipuri de evenimente (Mereuță et al., 2022). Pe baza acestui studiu, am concluzionat că algoritmi terestri MODIS nu sunt încă potriviți pentru achiziționarea proprietăților aerosolilor de fum petrochimic, din cauza proprietăților lor de absorbție puternică a luminii. Acest studiu a demonstrat o metodă nouă de identificare și analiză a penelor de fum, care nu necesită, în unele cazuri, campanii de teren potențial periculoase. Credem că aceste tipuri de studii reprezintă o indicație puternică a necesității de îmbunătățire a modelelor și algoritmi de achiziție a aerosolilor atmosferici. Pentru aceste tipuri de aerosoli, estimările mai bune ale AOD sunt importante atât pentru calitatea aerului, cât și pentru implicațiile asupra schimbărilor climatice (Mereuță et al., 2022).

Utilizarea datelor din modele de tip reanaliză, cum ar fi MERRA-2 sau CAMS, pot aduce un plus în estimările emisiilor de poluanți specifici fumului petrochimic. În cadrul tezei s-a analizat datele MERRA-2 s-au dovedit a fi mai capabile de a distinge o creștere relativă a emisiilor de PM<sub>2.5</sub> și a AOD-ului în urma evenimentelor cu eliberare de fum petrochimic. Spre deosebire de datele MODIS, MERRA-2 a estimat valori mai ridicate de AOD însă și acestea au fost considerabil mai scăzute decât AOD-ul estimat de CALIPSO pentru evenimentul 14. Din acest motiv am utilizat o metodă hibridă de estimare a PM<sub>2.5</sub> bazată pe datele MERRA-2 și corectate prin intermediul datelor CALIPSO. Astfel evenimentul 14 a înregistrat valori de PM<sub>2.5</sub> cuprinse între 15 – 263  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Harta de hazard delimitată în urma acestor estimări relevă o suprafață considerabilă expusă unor condiții nesănătoase din punct de vedere a calității aerului. Ținând cont de datele CALIPSO putem concluziona că elevația penei de fum (cuprinsă între 2-4 km) a reprezentat un factor atenuant pentru riscul la expunerea unor concentrații ridicate de particule materiale. Acest studiu evidențiază necesitate sinergiei datelor atmosferice în analiza și cuantificare cât mai holistică atât a proprietăților și concentrațiilor de poluanților de interes cât și a proximității față de elementele potențiale expuse riscului.

Observațiile satelitare prezentate în cadrul tezei oferă o suită de caracteristici măsurabile unice ce pot fi utilizate cu succes în validarea modelelor de estimare a efectelor și

consecințelor fumului petrochimic. Astfel, prin intermediul unor modele mai robuste putem asocia un nivel de risc cât mai realist în cazul expunerii la fum petrochimic. De asemenea o cuantificare corectă a acestui tip de aerosol va putea duce la îmbunătățirea metodelor de achiziție satelitare. În ceea ce privește studiile privind calitatea aerului, acest studiu poate aduce o tehnică nouă de observare a carbonului negru și poate fi folosit în mod sinergic în descrierea evoluției în timp și spațiu a unor astfel de pene de poluant. Progresele în domeniul senzorilor satelitari pot oferi o valoare adăugată sub formă de date aproape în timp real, ajutând la eficientizarea eforturilor de răspuns la dezastre. În acest sens teza de doctorat poate reprezenta un punct important în dezvoltarea unui algoritm de achiziție calibrat pentru delimitarea și determinarea timpurie a hazardelor asociate aerosolilor atmosferici.

În cadrul temei de doctorat s-a elaborat o bază de date ce cuprinde cele importante accidente industriale majore din industria petrochimică globală din perioada 2008 - 2020. Aceste evenimente sunt detaliate individual și identificate în funcție de locația, tipologia, cauzalitate. Aceste informații împreună cu evoluția spațio-temporală a penelor de fum oferă un real interes pentru studiile din sfera analizelor de risc industrial și NaTech. În cazul tehnicilor de modelare predictive, datele privind accidente istorice joacă un rol important atât în validarea modelelor cât și în optimizarea acestora.



## Bibliografie

- Andreae, M.O., 2019. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning – an updated assessment. *Atmospheric Chem. Phys.* 19, 8523–8546. <https://doi.org/10.5194/acp-19-8523-2019>
- Brauer, M., Freedman, G., Frostad, J., Van Donkelaar, A., Martin, R.V., Dentener, F., Dingenen, R.V., Estep, K., Amini, H., Apte, J.S., Balakrishnan, K., Barregard, L., Broday, D., Feigin, V., Ghosh, S., Hopke, P.K., Knibbs, L.D., Kokubo, Y., Liu, Y., Ma, S., Morawska, L., Sangrador, J.L.T., Shaddick, G., Anderson, H.R., Vos, T., Forouzanfar, M.H., Burnett, R.T., Cohen, A., 2016. Ambient Air Pollution Exposure Estimation for the Global Burden of Disease 2013. *Environ. Sci. Technol.* 50, 79–88. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b03709>
- Ceolato, R., Bedoya-Velásquez, A.E., Fossard, F., Mouysset, V., Paulien, L., Lefebvre, S., Mazzoleni, C., Sorensen, C., Berg, M.J., Yon, J., 2022. Black carbon aerosol number and mass concentration measurements by picosecond short-range elastic backscatter lidar. *Sci. Rep.* 12, 8443. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11954-7>
- Ceolato, R., Paulien, L., Maughan, J.B., Sorensen, C.M., Berg, M.J., 2020. Radiative properties of soot fractal superaggregates including backscattering and depolarization. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* 247, 106940. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2020.106940>
- Daum, P.H., Al-Sunaid, A., Busness, K.M., Hales, J.M., Mazurek, M., 1993. Studies of the Kuwait oil fire plume during midsummer 1991. *J. Geophys. Res.* 98, 16809. <https://doi.org/10.1029/93JD01204>
- Dutkiewicz, V.A., Alvi, S., Ghauri, B.M., Choudhary, M.I., Husain, L., 2009. Black carbon aerosols in urban air in South Asia. *Atmos. Environ.* 43, 1737–1744. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.12.043>
- Ferek, R.J., Hobbs, P.V., Herring, J.A., Laursen, K.K., Weiss, R.E., Rasmussen, R.A., 1992. Chemical composition of emissions from the Kuwait oil fires. *J. Geophys. Res.* 97, 14483. <https://doi.org/10.1029/92JD01247>
- Finer, M., Novoa, S., Weisse, M.J., Petersen, R., Mascaro, J., Souto, T., Stearns, F., Martinez, R.G., 2018. Combating deforestation: From satellite to intervention. *Science* 360, 1303–1305. <https://doi.org/10.1126/science.aat1203>
- Gullett, B.K., Aurell, J., Holder, A., Mitchell, W., Greenwell, D., Hays, M., Conmy, R., Tabor, D., Preston, W., George, I., Abrahamson, J.P., Vander Wal, R., Holder, E., 2017. Characterization of emissions and residues from simulations of the Deepwater Horizon surface oil burns. *Mar. Pollut. Bull.* 117, 392–405. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.01.083>
- Gullett, B.K., Hays, M.D., Tabor, D., Wal, R.V., 2016. Characterization of the particulate emissions from the BP Deepwater Horizon surface oil burns. *Mar. Pollut. Bull.* 107, 216–223. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.03.069>
- Gupta, P., Remer, L.A., Levy, R.C., Mattoo, S., 2018. Validation of MODIS 3 km land aerosol optical depth from NASA’s EOS Terra and Aqua missions. *Atmospheric Meas. Tech.* 11, 3145–3159. <https://doi.org/10.5194/amt-11-3145-2018>

- Haarig, M., Ansmann, A., Baars, H., Jimenez, C., Veselovskii, I., Engelmann, R., Althausen, D., 2018. Depolarization and lidar ratios at 355, 532, and 1064 nm and microphysical properties of aged tropospheric and stratospheric Canadian wildfire smoke. *Atmospheric Chem. Phys.* 18, 11847–11861. <https://doi.org/10.5194/acp-18-11847-2018>
- Hobbs, P.V., Radke, L.F., 1992. Airborne Studies of the Smoke from the Kuwait Oil Fires. *Science* 256, 987–991. <https://doi.org/10.1126/science.256.5059.987>
- Holben, B.N., Eck, T.F., Slutsker, I., Tanré, D., Buis, J.P., Setzer, A., Vermote, E., Reagan, J.A., Kaufman, Y.J., Nakajima, T., Lavenu, F., Jankowiak, I., Smirnov, A., 1998. AERONET—A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization. *Remote Sens. Environ.* 66, 1–16. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(98\)00031-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00031-5)
- Illingworth, A.J., Barker, H.W., Beljaars, A., Ceccaldi, M., Chepfer, H., Clerbaux, N., Cole, J., Delanöe, J., Domenech, C., Donovan, D.P., Fukuda, S., Hiraakata, M., Hogan, R.J., Huenerbein, A., Kollias, P., Kubota, T., Nakajima, T., Nakajima, T.Y., Nishizawa, T., Ohno, Y., Okamoto, H., Oki, R., Sato, K., Satoh, M., Shephard, M.W., Velázquez-Blázquez, A., Wandinger, U., Wehr, T., Van Zadelhoff, G.-J., 2015. The EarthCARE Satellite: The Next Step Forward in Global Measurements of Clouds, Aerosols, Precipitation, and Radiation. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 96, 1311–1332. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00227.1>
- Kim, M.-H., Omar, A.H., Tackett, J.L., Vaughan, M.A., Winker, D.M., Trepte, C.R., Hu, Y., Liu, Z., Poole, L.R., Pitts, M.C., Kar, J., Magill, B.E., 2018. The CALIPSO version 4 automated aerosol classification and lidar ratio selection algorithm. *Atmospheric Meas. Tech.* 11, 6107–6135. <https://doi.org/10.5194/amt-11-6107-2018>
- Konovalov, I.B., Lvova, D.A., Beekmann, M., Jethva, H., Mikhailov, E.F., Paris, J.-D., Belan, B.D., Kozlov, V.S., Ciais, P., Andreae, M.O., 2018. Estimation of black carbon emissions from Siberian fires using satellite observations of absorption and extinction optical depths. *Atmospheric Chem. Phys.* 18, 14889–14924. <https://doi.org/10.5194/acp-18-14889-2018>
- Laumbach, R.J., Kipen, H.M., 2012. Respiratory health effects of air pollution: Update on biomass smoke and traffic pollution. *J. Allergy Clin. Immunol.* 129, 3–11. <https://doi.org/10.1016/j.jaci.2011.11.021>
- Li, S., Kahn, R., Chin, M., Garay, M.J., Liu, Y., 2015. Improving satellite-retrieved aerosol microphysical properties using GOCART data. *Atmospheric Meas. Tech.* 8, 1157–1171. <https://doi.org/10.5194/amt-8-1157-2015>
- Mather, T.A., Harrison, R.G., Tsanev, V.I., Pyle, D.M., Karumudi, M.L., Bennett, A.J., Sawyer, G.M., Highwood, E.J., 2007. Observations of the plume generated by the December 2005 oil depot explosions and prolonged fire at Buncefield (Hertfordshire, UK) and associated atmospheric changes. *Proc. R. Soc. Math. Phys. Eng. Sci.* 463, 1153–1177. <https://doi.org/10.1098/rspa.2006.1810>
- Mereuță, A., Ajtai, N., Radovici, A.T., Papagiannopoulos, N., Deaconu, L.T., Botezan, C.S., Ștefănie, H.I., Nicolae, D., Ozunu, A., 2022. A novel method of identifying and analysing oil smoke plumes based on MODIS and CALIPSO satellite data. *Atmospheric Chem. Phys.* 22, 5071–5098. <https://doi.org/10.5194/acp-22-5071-2022>
- Muthike, D., 2015. Satellite Earth Observations in Support of Disaster Risk Reduction Special 2015 WCDRR Edition. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3032.9046>

- Nakajima, T., Hayasaka, T., Higurashi, A., Hashida, G., Moharram-Nejad, N., Najafi, Y., Valavi, H., 1996. Aerosol Optical Properties in the Iranian Region Obtained by Ground-Based Solar Radiation Measurements in the Summer Of 1991. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 35, 1265–1278. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1996\)035<1265:AOPITI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1996)035<1265:AOPITI>2.0.CO;2)
- Okada, K., Ikegami, M., Uchino, O., Nikaidou, Y., Zaizen, Y., Tsutsumi, Y., Makino, Y., 1992. Extremely high proportions of soot particles in the upper troposphere over Japan. *Geophys. Res. Lett.* 19, 921–924. <https://doi.org/10.1029/92GL00487>
- Pilewskie, P., Valero, F.P.J., 1992. Radiative effects of the smoke clouds from the Kuwait oil fires. *J. Geophys. Res.* 97, 14541. <https://doi.org/10.1029/92JD01371>
- Ramanathan, V., Carmichael, G., 2008. Global and regional climate changes due to black carbon. *Nat. Geosci.* 1, 221–227. <https://doi.org/10.1038/ngeo156>
- Ross, J.L., Waggoner, A.P., Hobbs, P.V., Ferek, R.J., 1996. Airborne Lidar Measurements of a Smoke Plume Produced by a Controlled Burn of Crude Oil on the Ocean. *J. Air Waste Manag. Assoc.* 1995 46, 327–334. <https://doi.org/10.1080/10473289.1996.10467467>
- Samset, B.H., Stjern, C.W., Andrews, E., Kahn, R.A., Myhre, G., Schulz, M., Schuster, G.L., 2018. Aerosol Absorption: Progress Towards Global and Regional Constraints. *Curr. Clim. Change Rep.* 4, 65–83. <https://doi.org/10.1007/s40641-018-0091-4>
- Sogacheva, L., Popp, T., Sayer, A.M., Dubovik, O., Garay, M.J., Heckel, A., Hsu, N.C., Jethva, H., Kahn, R.A., Kolmonen, P., Kosmale, M., De Leeuw, G., Levy, R.C., Litvinov, P., Lyapustin, A., North, P., Torres, O., Arola, A., 2020. Merging regional and global aerosol optical depth records from major available satellite products. *Atmospheric Chem. Phys.* 20, 2031–2056. <https://doi.org/10.5194/acp-20-2031-2020>
- Stevens, R., Pinto, J., Mamane, Y., Ondov, J., Abdulraheem, M., Al-Majed, N., Sadek, M., Cofer, W., Ellenson, W., Kellogg, R., 1993. Chemical and Physical Properties of Emissions from Kuwaiti Oil Fires. *Water Sci. Technol.* 27, 223–233. <https://doi.org/10.2166/wst.1993.0555>
- Tackett, J.L., Winker, D.M., Getzewich, B.J., Vaughan, M.A., Young, S.A., Kar, J., 2018. CALIPSO lidar level 3 aerosol profile product: version 3 algorithm design. *Atmospheric Meas. Tech.* 11, 4129–4152. <https://doi.org/10.5194/amt-11-4129-2018>
- Tassa, A., 2020. The socio-economic value of satellite earth observations: huge, yet to be measured. *J. Econ. Policy Reform* 23, 34–48. <https://doi.org/10.1080/17487870.2019.1601565>
- Wei, X., Chang, N.-B., Bai, K., Gao, W., 2020. Satellite remote sensing of aerosol optical depth: advances, challenges, and perspectives. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 50, 1640–1725. <https://doi.org/10.1080/10643389.2019.1665944>
- Young, S.A., Vaughan, M.A., Garnier, A., Tackett, J.L., Lambeth, J.D., Powell, K.A., 2018. Extinction and optical depth retrievals for CALIPSO’s Version 4 data release. *Atmospheric Meas. Tech.* 11, 5701–5727. <https://doi.org/10.5194/amt-11-5701-2018>
- Zhang, K., Batterman, S., 2013. Air pollution and health risks due to vehicle traffic. *Sci. Total Environ.* 450–451, 307–316. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.01.074>