

ACADEMIA OAMENILOR DE ȘTIINȚĂ DIN ROMANIA



**Monitorizarea eutrofizării din Delta Dunării pe baza
algoritmilor de tip deep learning**

- Științe geonomice -

- RAPORT Ianuarie – Iunie 2025 -

Director Proiect

CS III dr. Sabin Rotaru

Membru Proiect

CS drd. Andrei Toma

Introducere

Calitatea apelor dulci este importantă pentru menținerea echilibrului ecosistemelor acvatice și pentru asigurarea resurselor necesare vieții umane și economice (*Ecosystems and Water Quality*, 2023). În ultimele decenii, aceste ecosisteme au fost afectate semnificativ de presiuni multiple, precum schimbările climatice, urbanizarea rapidă, activitățile agricole și industriale sau poluarea difuză și punctuală (Xia et al., 2016). Aceste presiuni contribuie la degradarea apelor prin eutrofizare, scăderea oxigenului dizolvat, încărcarea cu nutrienți și apariția înfloririlor alge, afectând în mod direct biodiversitatea și funcționalitatea acestora. În acest context, monitorizarea eficientă și continuă a calității apei devine o necesitate stringentă pentru protecția mediului și pentru fundamentarea politicilor de gestionare durabilă a resurselor. Obiectivele globale precum Agenda 2030 (*Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development* | Department of Economic and Social Affairs, n.d.) și Obiectivele de Dezvoltare Durabilă (*THE 17 GOALS* | Sustainable Development, n.d.) subliniază importanța adoptării unor metode moderne, rapide și fiabile de monitorizare care să ofere date relevante, în timp util, pe suprafețe extinse.

Calitatea apelor din Delta Dunării este influențată semnificativ de aportul de poluanți transportați de fluviul Dunărea, care traversează multiple regiuni industrializate și agricole înainte de a se vărsa în Marea Neagră. Acești poluanți provin din deversări directe de ape uzate, dar și din scurgeri difuze de suprafață, adesea încărcate cu nutrienți și substanțe chimice utilizate în agricultură. Sursele de poluare pot fi atât punctuale, cât și nepunctuale, situate atât în amonte, cât și în aval, ceea ce face ca monitorizarea și controlul calității apei în această zonă să fie o provocare de ordin regional. Delta Dunării este un ecosistem de o importanță ecologică deosebită, fiind protejat prin multiple reglementări naționale și internaționale, inclusiv ca Sit al Patrimoniului Mondial UNESCO, Rezervație a Biosferei și Zonă Umedă de Importanță Internațională conform Convenției Ramsar.

Metodele tradiționale de monitorizare, bazate pe prelevarea de probe și analize de laborator, asigură măsurători de înaltă precizie, dar sunt adesea costisitoare, consumatoare de timp și limitate în capacitatea de acoperire spațială și temporală (Liu et al., 2020; Llodrà-Llabrés et al., 2023; Zhang et al., 2024). Accesul dificil la anumite corpuri de apă, mai ales în regiuni izolate sau greu accesibile, reduce considerabil frecvența măsurărilor și capacitatea de a surprinde variațiile rapide ale parametrilor de calitate. Teledetecția satelitară oferă o soluție

complementară valoroasă, furnizând observații frecvente, pe suprafețe mari, și permițând analiza dinamicii spațiale și temporale a apei într-un mod eficient și reproductibil. Deși nu poate înlocui complet monitorizarea in situ, teledetecția permite extinderea și completarea bazelor de date existente, contribuind la o mai bună înțelegere și anticipare a proceselor ecologice.

Parametrii fotosensibili ai calității apei, precum clorofila-a (Chl-a), materia organică dizolvată colorată (CDOM), solidele în suspensie totale (TSS) și turbiditatea, pot fi monitorizați eficient cu ajutorul imaginilor multispectrale, deoarece prezintă semnături spectrale distincte (Ali et al., 2024; Atton Beckmann et al., 2025; Cao et al., 2022; Guan et al., 2020). Clorofila-a este un indicator esențial al biomasei algale și al gradului de eutrofizare, fiind adesea utilizată în calculul indicelui stării trofice (TSI), împreună cu parametri precum fosforul total și adâncimea discului Secchi. Clorofila are o reflectanță caracteristică în domeniul verde și infraroșu apropiat (NIR) și o absorbție ridicată în benzile albastră și roșie, proprietăți care permit estimarea sa prin metode spectrale. Oxigenul dizolvat (DO), un alt parametru esențial, reflectă capacitatea ecosistemului de a susține viața acvatică și este esențial pentru evaluarea stării ecologice generale a apei.

Misiunile Sentinel-2 și Landsat-8/9, prin senzorii lor multispectrali avansați (MSI și OLI), oferă date de înaltă calitate, calibrate și fiabile, esențiale pentru analiza parametrilor optici ai apei (Poddar et al., 2019). Sentinel-2, parte a programului Copernicus, pune la dispoziție o combinație optimă de rezoluție spațială (până la 10 metri), acoperire spectrală (13 benzi în domeniile vizibil, NIR și SWIR) și frecvență de reobservare (aproximativ cinci zile), ceea ce îl face extrem de util pentru monitorizarea dinamică a corpurilor de apă, inclusiv a celor de mici dimensiuni. Reflectanța algală în jurul lungimii de undă de 705 nm, în special în banda red-edge, este deosebit de relevantă pentru detectarea înfloririlor algale, oferind posibilitatea de a dezvolta algoritmi de inversie eficienți pentru estimarea concentrației de clorofilă-a.

Dezvoltările recente în domeniul prelucrării imaginilor și al inteligenței artificiale au dus la apariția unor metode tot mai performante pentru extragerea și analiza informațiilor din datele satelitare. Modelele de tip rețea neuronală profundă, precum U-Net, permit segmentarea semantică detaliată a imaginilor și pot fi utilizate pentru clasificarea zonelor acvatice în funcție de gradul de eutrofizare sau prezența poluanților (Deng et al., 2024). În paralel cu modelele empirice, semi-analitice și analitice, aceste abordări bazate pe învățare automată

oferă o capacitate crescută de generalizare și de adaptare la variabilitatea spectrală și spațială specifică ecosistemelor acvatice.

Proiectul își propune să exploreze potențialul datelor satelitare multispectrale, pentru monitorizarea parametrilor optici ai calității apei în ecosisteme vulnerabile. Se urmărește integrarea datelor satelitare cu tehnici avansate de procesare automată, pentru estimarea clorofilei-a, a turbidității, a materialelor în suspensie și a materiei organice dizolvate, cu aplicație directă în evaluarea stării lacurilor din Delta Dunării.

Date in situ

Delta Dunării constituie una dintre cele mai vaste și valoroase zone umede din Europa, cu o dinamică geomorfologică complexă, influențată de interacțiunea dintre debitele fluviului și procesele marine din Marea Neagră. Diversitatea proceselor hidrologice, de la aportul fluvial până la efectele valurilor și ale curenților litorali, a modelat un teritoriu eterogen, alcătuit din două mari unități: o zonă dominată de influența râurilor, în partea vestică, și o zonă cu caracteristici fluvio-marine, localizată spre est și sud, separate de o serie de formațiuni nisipoase extinse.

Datele in situ (Figura 1) au fost colectate în cea mai mare măsură din depresiunea Lumina-Roșu, care cuprinde un complex de lacuri (Roșu, Roșuleț, Puiu, Lumina, Puiulet, Macovei și Iacub) ce prezintă un grad ridicat de conservare naturală. Aceste lacuri sunt conectate indirect cu brațul Sulina printr-o rețea de canale hidrotehnice, care reglează schimburile de apă, dar reduc semnificativ influența directă a aluviunilor fluviale. Principalele fluxuri hidrologice provin din canalul Crișan-Caraorman, responsabil de alimentarea cu apă a lacurilor Roșu și Puiu, în timp ce partea nordică a sistemului primește aport din canalul Vătafu-Imputita. Evacuarea apelor se realizează prin canale precum Busurca și Tătaru, fiind completată de alte canale de conexiune secundare.

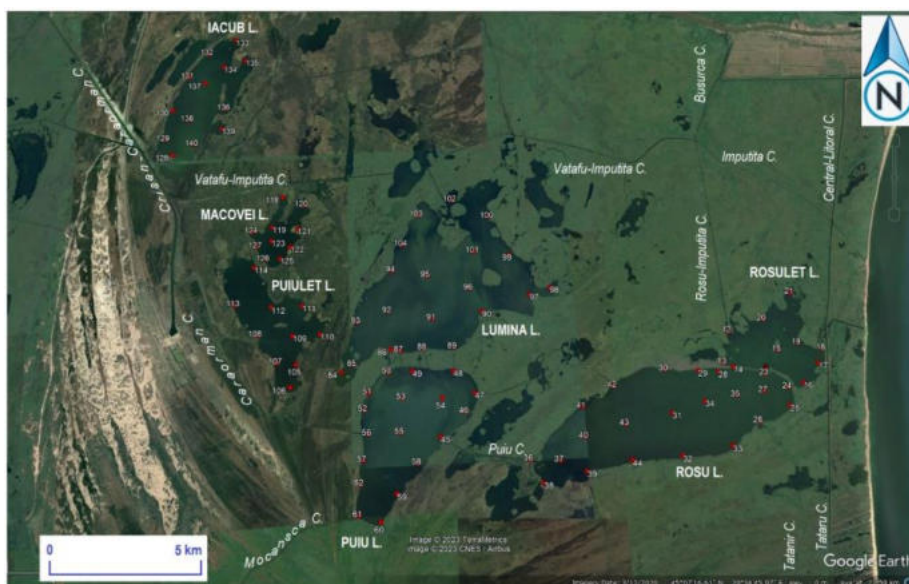


Figura 1. Sursele de prelevare a datelor in situ.

Această zonă se remarcă prin diversitatea formelor de stres la care este expusă, atât de origine naturală, cât și generată de activități umane, constituind astfel un cadru ideal pentru preluarea probelor care vor fi utilizate în cadrul evaluării calității apei și a sensibilității ecosistemelor la factori de presiune variabili.

Starea calității apei în cadrul fiecărui lac este determinată în principal de dinamica hidrologică locală, în special de volumul de apă care intră și iese din sistemul lacustru. Această dinamică este influențată de variațiile naturale ale debitului fluviului Dunărea, de regimul precipitațiilor și de procesele de evaporare. Pentru a surprinde variabilitatea sezonieră a acestor influențe, campaniile de prelevare a probelor de apă s-au desfășurat anual, pe o durată de aproape 15 ani, utilizând nava de cercetare „Istros” a Institutului Național de Geologie și Geoecologie Marină – GeoEcoMar din București. Un exemplu de system de prelevare se poate observa în figura 2. În cadrul acestei cercetări, o serie de parametri esențiali ai calității apei au fost monitorizați atât în teren, cât și în laborator, pentru a evalua caracteristicile fizico-chimice ale lacurilor studiate. Măsurătorile in situ au fost realizate la fiecare punct de eșantionare, utilizând un multiparametru portabil de teren WTW 3630 IDS, care a permis determinarea directă a temperaturii, pH-ului, oxigenului dizolvat, conductivității electrice și a concentrației totale de solide dizolvate.

Analizele de laborator au fost efectuate ulterior în vederea determinării concentrațiilor unor compuși chimici și substanțe nutritive relevante pentru starea ecologică a apei. Pentru aceste determinări s-au folosit spectrofotometrul UV-VIS Hach DR6000 și turbidimetrul portabil

Hach 2100. Parametrii analizați au inclus azotul nitric și nitros ($\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$), fosforul sub formă de fosfați ($\text{PO}_4\text{-P}$), siliciul dizolvat, clorofila-a, carbonul organic total (TOC), sulfații, turbiditatea, solidele în suspensie totale (TSS), sulful și hidrogenul sulfurat, precum și prezența detergenților sintetici.

Zeci de probe au fost procesate anual, iar rezultatele urmează să intergrate în sistemul de machine learning pentru clasificarea imaginilor satelitare.

Exemplu date in situ utilizate - Concentrația de clorofilă-a și variabilitatea sezonieră - prezentarea datelor pentru anul 2022

În perioada cu debite ridicate (mai 2022), valorile clorofilei-a s-au menținut sub pragul de 25 $\mu\text{g/L}$, asociat cu prima clasă de calitate a apei (foarte bună), conform criteriilor de evaluare. Intervalele de variație au fost relativ restrânse: în secțiunile de control valorile au fost cuprinse între 4,11 și 16,08 $\mu\text{g/L}$, în Lacul Roșuleț între 2,25 și 3,86 $\mu\text{g/L}$, în Lacul Roșu între 1,71 și 11,89 $\mu\text{g/L}$, iar în Lacul Puiu între 1,22 și 13,00 $\mu\text{g/L}$. Aceste concentrații reduse sunt asociate cu condiții hidrologice și climatice tipice sezonului de primăvară, cum ar fi temperaturi mai scăzute și precipitații semnificative, care limitează dezvoltarea fitoplanctonului.

În contrast, în perioada cu debite scăzute (august 2022), valorile Chl-a au fost mult mai ridicate și cu o variabilitate sporită. În acea etapă, concentrațiile în secțiunile de control au variat între 5,36 și 53,07 $\mu\text{g/L}$, în timp ce în lacurile analizate au fost înregistrate valori semnificativ mai mari: Lacul Lumina (37,36–121,09 $\mu\text{g/L}$), Puiulet (90,45–142,94 $\mu\text{g/L}$), Macovei (49,62–125,66 $\mu\text{g/L}$) și Iacub (74,22–301,55 $\mu\text{g/L}$). Aceste creșteri pot fi atribuite, în principal, temperaturilor ridicate din timpul verii, care favorizează procesele de remineralizare a substanțelor nutritive și susțin producția primară.

Valorile solidei în suspensie totală (TSS, exprimate în mg/L) au prezentat o variație semnificativă între cele două campanii de prelevare, influențate de regimul hidrologic diferit. În perioada cu debite ridicate ale fluviului Dunărea (mai 2022), concentrațiile de TSS au fost în general scăzute, încadrându-se sub pragul de 40 mg/L , considerat acceptabil pentru apele dulci din punct de vedere ecologic. În această etapă, probele au indicat următoarele intervale

de variație: 12–39 mg/L în secțiunile de control, 3–6 mg/L în Lacul Roșuleț, 3–10 mg/L în Lacul Roșu și 3–16 mg/L în Lacul Puiu. Valorile reduse pot fi asociate cu diluarea cauzată de volumurile mari de apă și cu scăderea proceselor de resuspensie a particulelor din sedimente.

În schimb, în perioada caracterizată de debite scăzute (august 2022), s-a observat o creștere considerabilă a concentrațiilor de TSS în toate lacurile investigate, multe dintre valorile înregistrate depășind pragul de 40 mg/L. În această etapă, probele au indicat următoarele valori: 18–43 mg/L în zonele de control, 31–78 mg/L în Lacul Lumina, 50–84 mg/L în Lacul Puiulet, 25–53 mg/L în Lacul Macovei și 32–93 mg/L în Lacul Iacob. Această creștere poate fi pusă pe seama evaporării accentuate în perioada secetoasă, a circulației mai reduse a apei și a intensificării activităților biologice și fizice care favorizează suspensia particulelor în coloana de apă.

Analiza contextului geografic – Acoperirea terenurilor

Metodologia utilizată în acest studiu de clasificare a acoperirii terenurilor a implicat analiza imagistică multisatelitară pe termen lung (Figura 2). Arhiva de imagini Landsat, disponibilă prin platforma Google Earth Engine (GEE) (Gorelick et al., 2017), a constituit sursa principală de date. Procesul a inclus etape precum importarea imaginilor, antrenarea unui model de clasificare a categoriilor de acoperire a solului (teren agricol, urban, pădure, apă, zone umede etc.), aplicarea acestui model asupra seriilor temporale și detectarea modificărilor spațiale.

Clasificarea a fost efectuată în mod repetat pentru mai multe perioade (1990, 2000, 2010, 2020), permițând identificarea tranzițiilor dintre clase. Faptul că datele au fost procesate în GEE a permis o analiză eficientă pe scară largă și replicabilă, datorită puterii de procesare a platformei și accesului facil la arhive satelitare istorice.

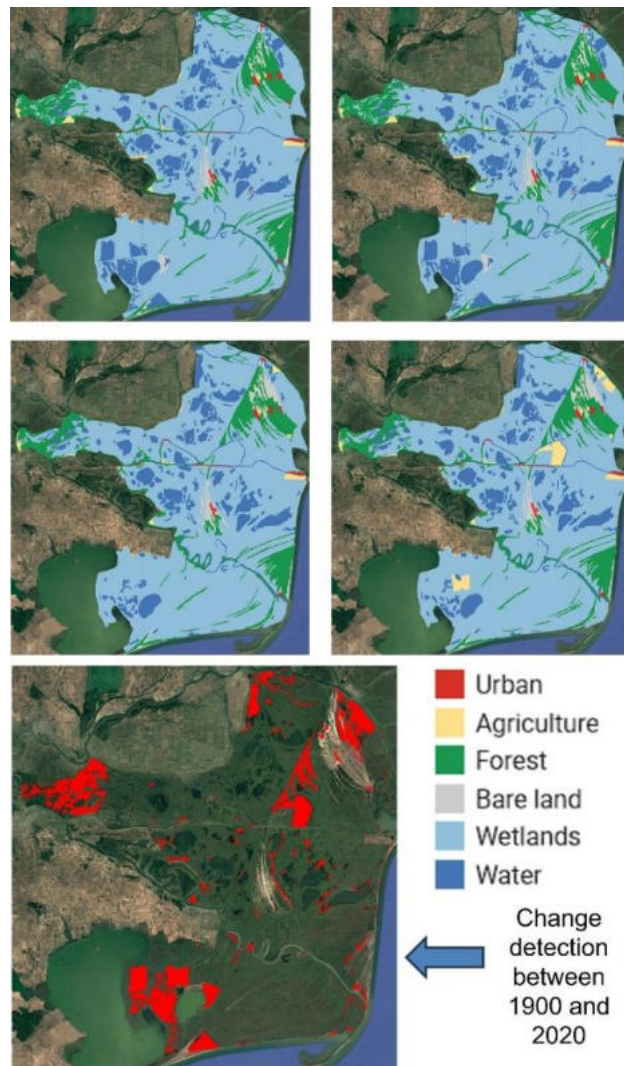


Figura 2. Schimbări de utilizare a terenului în Delta Dunării între 1900 și 2020.

Figura 3, care prezintă variația suprafeței ocupate de fiecare clasă de acoperire în intervalul 1990–2020, indică o stabilitate relativă a suprafețelor totale pentru majoritatea claselor, însă cu unele fluctuații importante. Zona umedă (wetlands), care domină peisajul, se menține ca cea mai extinsă clasă, cu o ușoară creștere până în 2010, urmată de o ușoară reducere până în 2020. Suprafața acoperită de apă (water) rămâne relativ constantă, cu variații minore.

În schimb, clasele precum pădurea (forest) și terenurile agricole (agriculture) prezintă scăderi ușoare în timp, semnalând o posibilă conversie a acestor suprafețe în alte forme de utilizare. Suprafața urbană (urban) este cea mai mică în termeni absoluți, dar tendința sa de creștere, deși subtilă la scară mare, indică o extindere treptată a infrastructurii construite. Terenurile neocupate (bare land) rămân aproape constante, sugerând o stabilitate a zonelor cu intervenție redusă sau neutilizate.

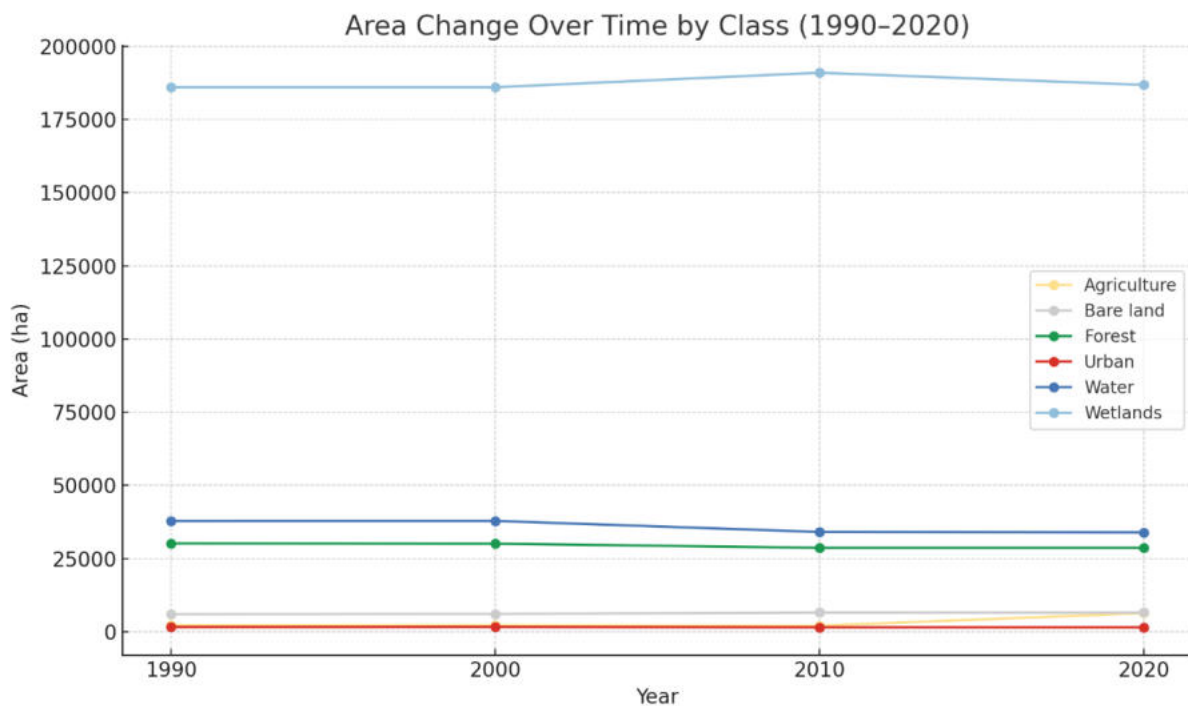


Figura 3. Evoluția suprafețelor ocupate de principalele clase de utilizare a terenului în Delta Dunării între 1990 și 2020.

Figura 4, care compară direct suprafețele claselor între anii 1990 și 2020, confirmă tendințele observate anterior. Se observă o creștere ușoară a suprafețelor urbane și agricole, în paralel cu o diminuare a pădurilor și a zonelor umede. Această redistribuire indică o presiune tot mai mare asupra habitatelor naturale, cauzată, cel mai probabil, de activități economice și intervenții antropice în teritoriu.

Per ansamblu, rezultatele sugerează că, deși dinamica acoperirii terenului este relativ lentă la scară decadală, tendințele cumulate în timp pot avea efecte semnificative asupra echilibrului ecologic al zonei.

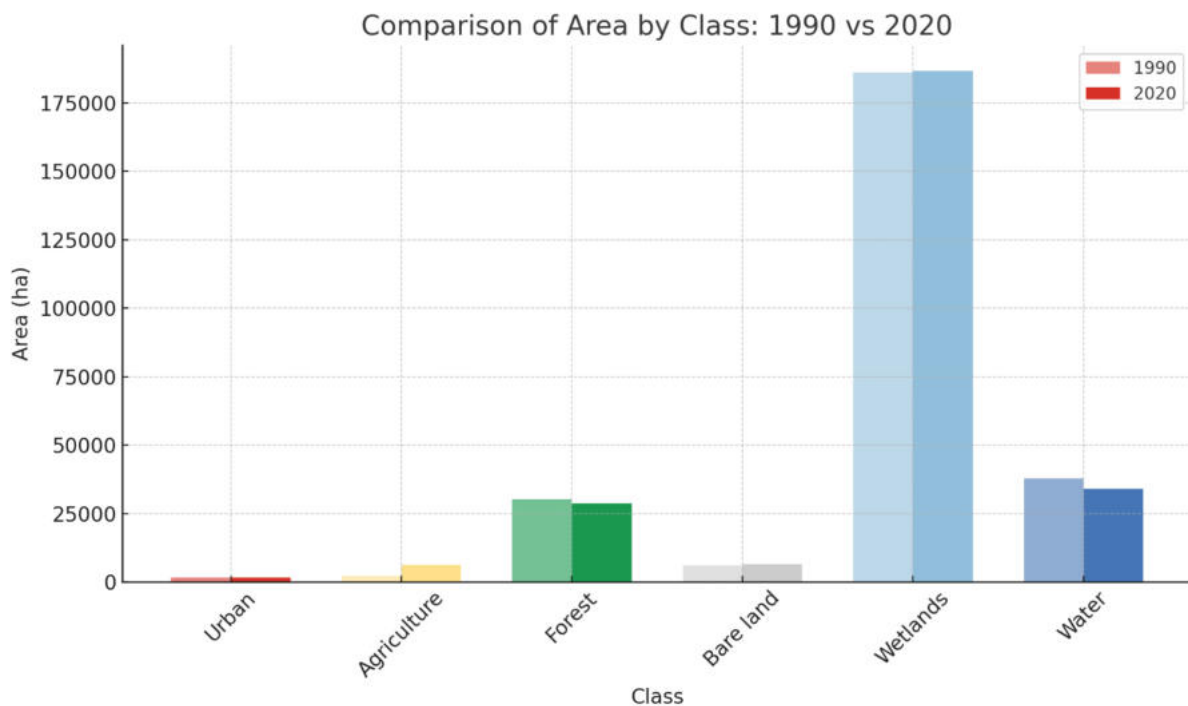


Figura 4. Compararea suprafețelor ocupate de principalele clase de utilizare a terenului în Delta Dunării în anii 1990 și 2020. Se observă o reducere ușoară a suprafeței acoperite de apă și pădure și o creștere discretă în clasa urbană, în timp ce zonele umede rămân dominante, cu variații minime între cele două perioade.

Analiza distribuției spațiale a zonelor umede și a vegetației asociate

Metodologia aplicată în acest studiu se bazează pe analiza integrată a imaginilor radar Sentinel-1 și a celor optice Sentinel-2, cu scopul de a monitoriza dinamicile apei și ale vegetației în ecosisteme umede. Un element central al acestei abordări îl reprezintă derivarea Water Permanence Index (WPI) din seria de date radar, un indice care reflectă frecvența cu care un pixel este detectat ca acoperit de apă într-un interval multitemporal. Acest indice permite diferențierea clară între corpurile de apă permanente, temporare sau intermitente, oferind o imagine de ansamblu asupra stabilității regimului hidrologic.

În paralel, din datele optice Sentinel-2 a fost extras indicele NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), care măsoară vigurozitatea vegetației. NDVI a fost utilizat nu doar punctual, ci și sub formă de serii temporale, pentru a evalua tendințele (NDVI Trend) și stabilitatea (NDVI Stability) vegetației. Aceste două analize temporale oferă informații importante despre modificările graduale ale acoperirii vegetale, precum și despre capacitatea ecosistemelor de a menține o funcționare ecologică constantă în fața fluctuațiilor hidrologice.

Monitorizarea integrată a regimului hidrologic și a dinamicii vegetației reprezintă o componentă esențială în evaluarea funcționării ecologice a zonelor umede. În acest context, combinarea indicatorilor WPI și NDVI, cu dimensiunile sale temporale (Trend și Stability), oferă o perspectivă valoroasă asupra interacțiunii complexe dintre apă, vegetație și riscurile de dezechilibru ecologic.

Water Permanence Index (WPI) (Figura 5) cuantifică gradul de prezență permanentă a apei într-un spațiu geografic dat, pe baza frecvenței reflectanței specifice apei în serii temporale de imagini satelitare. Zonele cu WPI ridicat corespund lacurilor și canalelor cu regim permanent de apă, reflectând o stabilitate hidrologică favorabilă dezvoltării ecosistemelor acvatice. În schimb, valorile scăzute ale WPI indică instabilitate hidrologică, sezonabilitate accentuată sau chiar uscări periodice, fiind caracteristice zonelor marginale sau corpurilor de apă temporare. Această distincție este fundamentală pentru identificarea sectoarelor vulnerabile la secetă, schimbări climatice sau intervenții antropice (de ex. restricționarea circulației apei, desecări, baraje etc.).

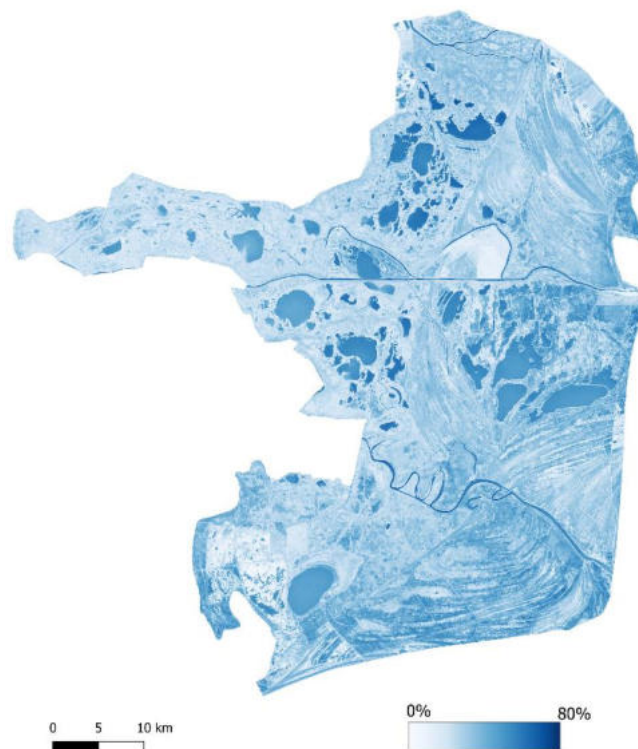


Figura 5. Distribuția spațială a valorilor Water Permanence Index (WPI) în Delta Dunării. Tonurile mai închise de albastru indică zone cu prezență constantă a apei pe parcursul perioadei analizate, în timp ce nuanțele deschise reflectă corpuri de apă sezoniere sau cu variabilitate hidrologică ridicată.

În paralel, **NDVI Trend** (Figura 6) evidențiază direcția pe termen lung a modificărilor vegetației verzi, fiind un bun indicator al adaptabilității ecosistemelor la condițiile

hidrologice. În zonele cu WPI ridicat, tendințele NDVI pozitive sugerează ecosisteme bine adaptate, în care vegetația terestră sau acvatică se dezvoltă constant, favorizată de disponibilitatea permanentă a apei. Însă în cazul lacurilor, un NDVI în creștere persistentă trebuie interpretat cu prudență: el poate reflecta fie o dezvoltare normală a vegetației acvatice (ex. macrofite submerse sau emergente), fie un simptom al **eutrofizării cronice**, în care concentrațiile ridicate de nutrienți (azot, fosfor) susțin înfloriri recurente de alge sau expansiunea necontrolată a vegetației flotante.

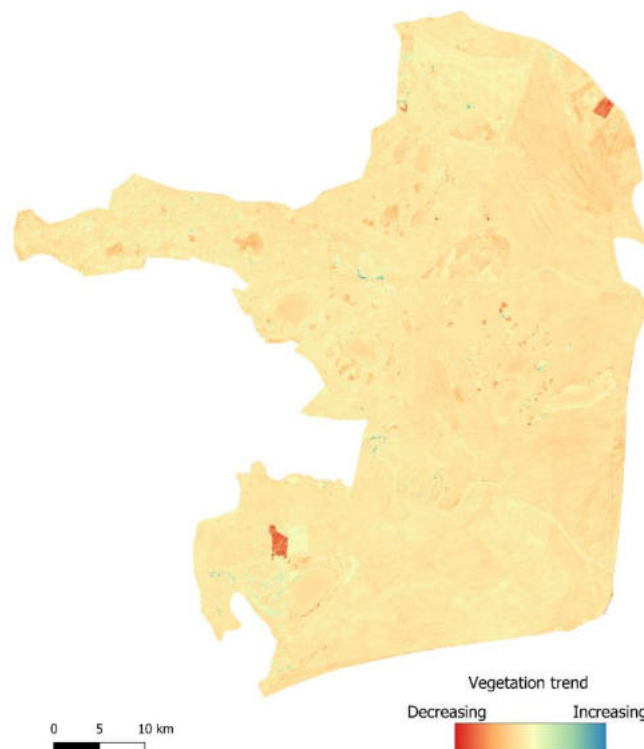


Figura 6. Tendința pe termen lung a vegetației în Delta Dunării, exprimată prin analiza evoluției NDVI. Nuanțele de roșu indică o scădere a activității vegetale, în timp ce tonurile de verde sugerează o creștere în densitatea sau acoperirea vegetației. Zonele galbene reflectă stabilitate relativă. Harta relevă sectoare izolate cu tendință descrescătoare, posibil asociate cu secarea, presiuni antropice sau modificări hidrologice locale.

În zonele cu **WPI scăzut**, NDVI Trend negativ indică o retragere progresivă a vegetației, cel mai probabil cauzată de reducerea frecvenței și duratei de inundare, accentuată de temperaturi ridicate, evaporare sau lipsa aportului fluvial. Pe de altă parte, tendințele NDVI oscilante sau în creștere bruscă pot semnala colonizări rapide post-inundații, dar și dezechilibre temporare, cum ar fi înverzirea excesivă urmată de colaps trofic în lipsa unui regim hidrologic stabil.

NDVI Stability (Figura 7), care exprimă variabilitatea în timp a indicelui de vegetație, adaugă o dimensiune suplimentară în interpretarea ecologică. Zonele cu stabilitate mare a NDVI reflectă un regim vegetativ relativ constant, ceea ce poate fi interpretat fie ca un semn

de reziliență ecologică, fie ca o **persistentă a unui dezechilibru**, cum ar fi prezența constantă a unei vegetații excesive sau invazive în lacuri (ex. *Lemna minor*, *Ceratophyllum*, sau înfloriri masive de fitoplancton). Acest aspect este esențial, întrucât un NDVI stabil în spațiu lacustru nu este întotdeauna un semn pozitiv, el poate ascunde o stare de **eutrofizare susținută**, în care vegetația oportunistă domină pe termen lung, blocând procesele naturale de autoreglare ale ecosistemului.

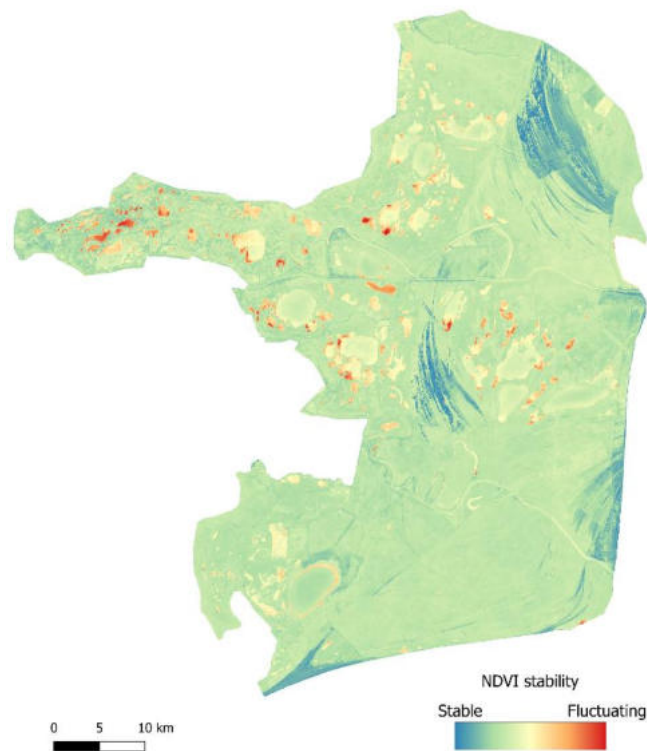


Figura 7. Stabilitatea indicelui NDVI în Delta Dunării, reflectând variabilitatea temporală a vegetației. Zonele colorate în albastru indică o acoperire vegetală stabilă în timp, în timp ce nuanțele de galben și roșu semnaleză fluctuații semnificative ale vegetației, posibile efecte ale variațiilor hidrologice, eutrofizării sau activităților antropice. Harta evidențiază arii cu dinamică ecologică ridicată, în special în cazul lacurilor.

Toate informațiile extrase din analiza indicatorilor satelitari precum WPI, NDVI Trend și NDVI Stability, alături de datele in situ și observațiile privind dinamica vegetației și regimul hidrologic, vor fi integrate în algoritmul final destinat detectării eutrofizării prin imagini satelitare. Acest algoritm va permite identificarea stării trofice a ecosistemelor acvatice pe baza combinației dintre indici spectrali, persistența apei și variația vegetației în timp.

Datele oferite de Global Surface Water Explorer (GSWE) vor completa setul de variabile utilizate, furnizând informații despre dinamica istorică a corpurilor de apă, în special privind frecvența și stabilitatea prezenței apei. Această integrare are ca scop creșterea acurateței în clasificarea lacurilor afectate de eutrofizare, diferențierea acestora de cele în stare naturală și

oferirea unui cadru operațional pentru monitorizarea spațială și temporală a riscurilor ecologice asociate.

Referințe

Ali, A., Zhou, G., Pablo Antezana Lopez, F., Xu, C., Jing, G., & Tan, Y. (2024). Deep learning for water quality multivariate assessment in inland water across China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *133*, 104078. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.104078>

Atton Beckmann, D., Spyrakos, E., Hunter, P., & Jones, I. D. (2025). Widespread phytoplankton monitoring in small lakes: A case study comparing satellite imagery from planet SuperDoves and ESA sentinel-2. *Frontiers in Remote Sensing*, *6*, 1549119. <https://doi.org/10.3389/frsen.2025.1549119>

Cao, Z., Ma, R., Melack, J. M., Duan, H., Liu, M., Kutser, T., Xue, K., Shen, M., Qi, T., & Yuan, H. (2022). Landsat observations of chlorophyll-a variations in Lake Taihu from 1984 to 2019. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *106*, 102642. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102642>

Deng, Y., Zhang, Y., Pan, D., Yang, S. X., & Gharabaghi, B. (2024). Review of Recent Advances in Remote Sensing and Machine Learning Methods for Lake Water Quality Management. *Remote Sensing*, *16*(22), 4196. <https://doi.org/10.3390/rs16224196>

Ecosystems and water quality. (2023, March 21).

<https://www.unep.org/interactives/wwqa/technical-highlights/ecosystems-and-water-quality>

- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Guan, Q., Feng, L., Hou, X., Schurgers, G., Zheng, Y., & Tang, J. (2020). Eutrophication changes in fifty large lakes on the Yangtze Plain of China derived from MERIS and OLCI observations. *Remote Sensing of Environment*, 246, 111890. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111890>
- Liu, D., Duan, H., Loisel, S., Hu, C., Zhang, G., Li, J., Yang, H., Thompson, J. R., Cao, Z., Shen, M., Ma, R., Zhang, M., & Han, W. (2020). Observations of water transparency in China's lakes from space. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 92, 102187. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102187>
- Llodrà-Llabrés, J., Martínez-López, J., Postma, T., Pérez-Martínez, C., & Alcaraz-Segura, D. (2023). Retrieving water chlorophyll-a concentration in inland waters from Sentinel-2 imagery: Review of operability, performance and ways forward. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 125, 103605. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103605>
- Poddar, S., Chacko, N., & Swain, D. (2019). Estimation of Chlorophyll-a in Northern Coastal Bay of Bengal Using Landsat-8 OLI and Sentinel-2 MSI Sensors. *Frontiers in Marine Science*, 6, 598. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00598>
- THE 17 GOALS | Sustainable Development. (n.d.). Retrieved June 29, 2025, from <https://sdgs.un.org/goals>
- Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development | Department of Economic and Social Affairs. (n.d.). Retrieved June 29, 2025, from <https://sdgs.un.org/2030agenda>

Xia, R., Zhang, Y., Critto, A., Wu, J., Fan, J., Zheng, Z., & Zhang, Y. (2016). The Potential Impacts of Climate Change Factors on Freshwater Eutrophication: Implications for Research and Countermeasures of Water Management in China. *Sustainability*, 8(3), 229. <https://doi.org/10.3390/su8030229>

Zhang, D., Shi, K., Wang, W., Wang, X., Zhang, Y., Qin, B., Zhu, M., Dong, B., & Zhang, Y. (2024). An optical mechanism-based deep learning approach for deriving water trophic state of China's lakes from Landsat images. *Water Research*, 252, 121181. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121181>