CZU: 528.8:502.1:623.746-519(478) **https://doi.org/10.59295/tehfizuvs25.24**

GENERAREA ȘI EVALUAREA MODELULUI DIGITAL AL TERENULUI ȘI CORONAMENTULUI ARBORILOR ÎN GRĂDINA BOTANICĂ NAȚIONALĂ PRIN TEHNOLOGIA LiDAR MONTATĂ PE UAV

GENERATION AND EVALUATION OF THE DIGITAL MODEL OF THE TERRAIN AND TREE CANOPY IN THE NATIONAL BOTANICAL GARDEN USING UAV-MOUNTED LiDAR TECHNOLOGY

Sergiu PASCARI[1] e-mail: pascariserghei@gmail.com ORCID ID: 0009-0003-2951-2405
Natalia ONICA[2] e-mail: onica.natalia@gb.usm.md ORCID ID: 0009-0006-0509-2153
Ion ROSCA[3] e-mail: ion.rosca@sti.usm.md ORCID ID: 0000-0002-1304-8033
Veaceslav SPRINCEAN[4] e-mail: veaceslav.sprincean@usm.md ORCID ID: 0000-0001-6719-7387

[1,4]Universitatea de Stat din Moldova
[2,3]Gradina Botanica Națională (Institut) Alexandru Ciubotaru, Universitatea de Stat din Moldova

Abstract. *This article provides a detailed presentation of the entire process of generating, processing, and evaluating the Digital Terrain Model (DTM) and the Canopy Height Model (CHM) within the National Botanical Garden "Alexandru Ciubotaru," using a high-performance LiDAR system mounted on a UAV platform. The investigation includes the stages of aerial data acquisition, automatic filtering and classification of the point cloud, vegetation removal to extract the real topographic surface, and the derivation of tree-canopy height through differentiation between the generated digital models. The dense and highly accurate LiDAR data enable advanced analyses of vegetation vertical structure, spatial distribution of trees, and biometric characteristics associated with individual specimens or forest stands. The obtained results ensure a reliable digital reconstruction of both terrain and vegetation bodies, supporting ecological and dendrometric studies as well as the development of modern tools for the monitoring, conservation, and intelligent management of natural ecosystems.*
Keywords*: UAV, LiDAR, digital terrain model (DTM), canopy height model (CHM), NDVI, National Botanical Garden (Institute).*

INTRODUCERE

Tehnologiile de teledetecție montate pe platforme aeriene fără pilot (UAV) au cunoscut în ultimul deceniu o dezvoltare accelerată, oferind rezoluții spațiale și temporale imposibil de obținut prin mijloace tradiționale. Printre acestea, sistemele LiDAR (Light Detection and Ranging) montate pe UAV s-au impus ca instrumente de referință pentru cartografierea 3D de înaltă precizie a terenului și vegetației, permițând generarea unor modele digitale detaliate și analiza structurală pe verticală a coronamentului arborilor [1, 2]. Grădina Botanică Națională (Institut) „Alexandru Ciubotaru" reprezintă unul dintre cele mai importante spații verzi ale municipiului Chișinău, având o structură complexă, cu colecții dendrologice, lacuri, terenuri horticole experimentale și zone de tranziție către frontul construit urban. Dinamica dezvoltărilor imobiliare în vecinătate, precum și presiunile antropice și climatice asupra ecosistemelor urbane justifică necesitatea unei monitorizări detaliate a stării vegetației și a modificărilor de microrelief [3]. În acest context, utilizarea unei platforme UAV dotate cu senzor LiDAR oferă posibilitatea obținerii unor modele digitale actualizate ale terenului și coronamentului, utile atât cercetării științifice, cât și planificării spațiale, amenajării peisagistice și educației pentru mediu. Scopul principal al studiului este de a demonstra modul în care datele LiDAR pot fi integrate cu produse fotogrammetrice și multispectrale pentru a caracteriza structural și funcțional vegetația din Grădina Botanică Națională (Institut) [4].

MATERIALE ȘI METODĂ

Zona de studiu cuprinde integral suprafața Grădinii Botanice Naționale (Institut) „Alexandru Ciubotaru”, precum și frontul construit situat în proximitatea nordică și vestică a acesteia, reprezentând una dintre cele mai importante interfețe ecologice dintre spațiul verde urban și dezvoltările rezidențiale recente din municipiul Chișinău. Din punct de vedere geomorfologic, perimetrul este caracterizat de un relief slab fragmentat, cu variații altitudinale moderate, dar cu microforme și structuri morfologice relevante pentru dinamica peisajului: versanți domoli ce delimitează ușoare interfluvii, taluzuri și zone de tranziție, lunci aluvionare, precum și depresiuni locale asociate sistemului de lacuri artificiale.

Aceste particularități topografice influențează distribuția vegetației și microclimatele interne, generând un mozaic ecologic bine definit. Vegetația prezintă un coronament eterogen, rezultat al coexistenței mai multor tipuri de acoperire: plantații dendrologice organizate pe colecții tematice, perdele forestiere de protecție, arbori izolați cu dezvoltare liberă, precum și zone ocupate de arbuști, vegetație palustră și întinse suprafețe ierboase. Variabilitatea structurală a coronamentului, în combinație cu gradul ridicat de diversitate floristică, face ca acest sit să fie deosebit de potrivit pentru analize complexe de teledetecție, estimarea parametrilor dendrometrici și monitorizarea evoluției ecosistemelor urbane.

Măsurătorile aeriene a fost realizată utilizând o platformă UAV de tip multirotor, optimizată pentru transportul unui senzor LiDAR de înaltă precizie, echipat cu receptor GNSS în modul RTK/PPK și unitate inerțială (IMU) de clasă profesională. Acest tip de configurație este larg utilizat în cercetările moderne, întrucât permite obținerea unor date tridimensionale de acuratețe centimetrica, chiar în condiții de teren complex sau în medii cu vegetație densă [1]. Sistemul LiDAR aeropurtat funcționează prin emiterea unui număr foarte mare de impulsuri laser pe secundă și înregistrarea timpului de întoarcere a fiecărui fascicul reflectat, generând un nor de puncte 3D de densitate ridicată. Ulterior, punctele sunt îmbogățite cu informații spectrale obținute din imaginile de suprapunere, proces care facilitează integrarea atributelor radiometrice cu structura geometrică a scenei [4]. Parametrii operaționali ai zborului au fost stabiliți în conformitate cu bunele practici din literatura de specialitate, pentru a asigura o rezoluție spațială adecvată și o calitate superioară a modelării terenului și coronamentului.

În consecință, altitudinea de zbor a variat între 80 și 120 m față de nivelul solului, în timp ce suprapunerile longitudinale și transversale au fost menținute la valori ridicate pentru a garanta acoperire completă, minimizarea umbrelor de vegetație și creșterea redundanței datelor. Viteza UAV a fost ajustată astfel încât densitatea finală a norului de puncte să atingă câteva sute de puncte pe metru pătrat în zonele de interes, densitate considerată optimă pentru cartografierea detaliată a structurii vegetației și a microreliefului [5]. Datele brute generate de sistemul LiDAR au fost supuse unui proces riguros de corecție și georeferențiere. Poziționarea exactă a fiecărui impuls laser a fost realizată prin aplicarea soluțiilor diferențiale GNSS în modul post-procesat (PPK), care permit reducerea erorilor induse de semnal, atmosferă sau pierderile temporare ale legăturii RTK. Coordonatele finale au fost transformate în sistemul național de referință, asigurând compatibilitate cu datele cartografice existente și facilitând integrarea analizelor ulterioare. Norii de puncte rezultați din achiziția LiDAR au fost importați și procesați în platforma CloudCompare, un software larg utilizat în cercetarea geospațială pentru analiza avansată a datelor 3D [6]. În etapa inițială, s-au aplicat filtre de reducere a zgomotului pentru a elimina punctele izolate sau artefactele provenite din reflexii atipice ale fasciculului laser, procedură necesară pentru obținerea unui nor de puncte uniform și lipsit de interferențe care ar putea afecta etapele ulterioare ale procesării [7]. Procesarea a continuat cu segmentarea norului de puncte, realizată prin algoritmi de detecție a structurilor locale și de separare spațială a obiectelor. Această segmentare a permis identificarea clusterelor naturale din date: suprafața solului, vegetația joasă, medie și înaltă, precum și structuri antropice precum cărări, clădiri sau elemente de infrastructură. Clasificarea punctelor a fost efectuată

folosind atât criterii geometrice – altitudine relativă, densitatea vecinătății, rugozitate – cât și tehnici statistice validate în literatura de specialitate, care permit diferențierea robustă a categoriilor tematice [8].

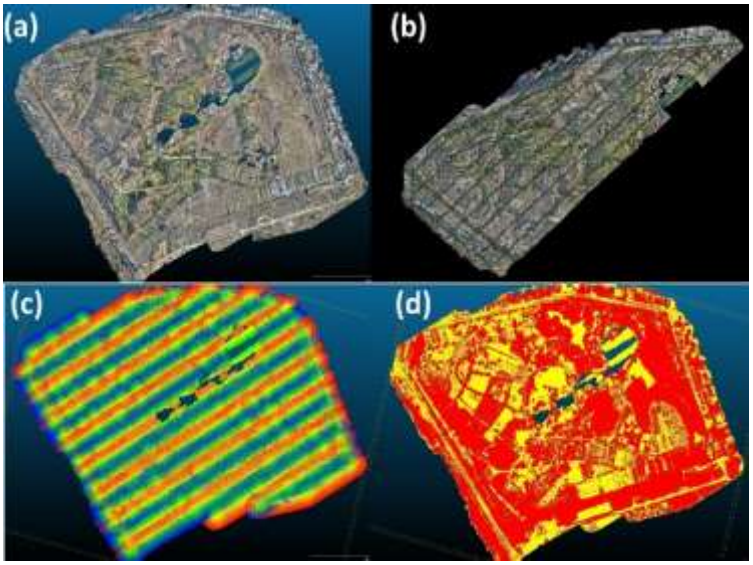
Identificarea punctelor de sol a reprezentat una dintre cele mai importante etape. Pentru aceasta, au fost utilizați algoritmi dedicați, precum Progressive TIN Densification sau filtrele de tip Cloth Simulation Filter (CSF), care modelează suprafața terenului prin adaptarea unui „covor" virtual peste norul de puncte și sunt recunoscuți pentru performanțele lor în zone cu vegetație densă sau relief variat [9]. Punctele de sol astfel extrase au constituit baza pentru interpolarea Modelului Digital al Terenului (DTM), utilizând atât suprafețe triangulate (TIN), cât și rasterizare la rezoluție uniformă, metodologii standardizate în cartografierea reliefului pe bază de LiDAR [10].

Punctele corespunzătoare vegetației au fost utilizate pentru derivarea Modelului Coronamentului Arborilor (CHM). CHM a fost generat prin calcularea diferenței dintre Modelul Digital al Suprafeței (DSM), care reprezintă altitudinile maxime ale obiectelor interceptate de laser (arbori, clădiri, structuri), și DTM-ul obținut anterior. Această abordare este considerată în literatura de teledetecție drept metoda standard pentru caracterizarea verticală a vegetației, pentru estimarea înălțimii arborilor, delimitarea coronamentelor și evaluarea structurii forestiere [5]. Rezultatul final constă în obținerea unui model tridimensional detaliat al terenului și al coronamentului vegetal, adecvat pentru analize ecologice, identificarea coroanelor individuale, estimarea biomasei și monitorizarea evoluției ecosistemelor urbane și naturale. Pentru obținerea unei reprezentări vizuale realiste și a unui suport cartografic de înaltă fidelitate, a fost generat un model 3D fotogrammetric utilizând imagini RGB de înaltă rezoluție, achiziționate în paralel cu datele LiDAR. Prelucrarea imaginilor a fost efectuată în software-ul Pix4Dmapper, care folosește algoritmi avansați de reconstrucție bazată pe Structure-from-Motion (SfM) și densificare multi-view pentru a produce modele tridimensionale detaliate și ortofotoplanuri georeferențiate [11]. Ortofotoplanul obținut a servit atât ca bază cartografică pentru analizele spațiale, cât și ca sursă de texturi realiste pentru modelul 3D derivat din datele LiDAR și fotogrammetrie, contribuind la o percepție vizuală coerentă a morfologiei terenului și a structurii vegetației.

Pe lângă imaginile RGB, au fost colectate și date multispectrale, incluzând canalul NIR (Near-Infrared), esențial pentru evaluarea sănătății vegetației. Utilizarea imaginilor multispectrale permite calcularea indicelui NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), un indicator consacrat pentru cuantificarea vigorii vegetației, a nivelului de stres și a activității fotosintetice [12]. Hărțile NDVI obținute au fost analizate în corelație cu parametrii de structură vegetală derivați din Modelul Coronamentului Arborilor (CHM). Această integrare a informației spectrale cu informația structurală 3D a făcut posibilă identificarea relațiilor spațiale dintre înălțimea coronamentului și starea fiziologică a vegetației, metodologie confirmată ca eficientă în studii recente privind monitorizarea ecosistemelor forestiere și urbane [5]. Prin combinarea produselor fotogrammetrice (ortofotoplan, model 3D texturat) cu datele LiDAR (DTM, DSM, CHM) și indicii spectrali (NDVI), a fost realizată o analiză integrată capabilă să descrie simultan geometria, fenologia și starea de sănătate a vegetației din zona de studiu. Această abordare multi-senzor reprezintă una dintre cele mai robuste metode actuale de caracterizare complexă a vegetației, în special în zone cu coronament eterogen și relief variat.

REZULTATE ȘI DISCUȚII

Datele LiDAR și fotogrammetrice au fost colectate cu ajutorul platformei UAV DJI Matrice 350 RTK echipată cu senzorul Zenmuse L2 care au permis generarea unui set complex de modele spațiale tridimensionale. Aceste modele au fost analizate în CloudCompare și Pix4Dmapper, oferind informații asupra structurii reliefului, distribuției vegetației, caracteristicilor coronamentului și organizării spațiale a infrastructurii din perimetrul Grădinii Botanice Naționale (Institut) "Alexandru Ciubotaru".



Figură 1. Produsele generate în DJI Terra pe baza datelor colectate cu DJI Matrice 350 RTK și senzorul LiDAR Zenmuse L2: (a) ortofotoplanul RGB de înaltă rezoluție obținut prin fotogrammetrie; (b) traseele misiunii UAV, care ilustrează suprapunerile de zbor; (c) modelul altimetric LiDAR colorat pe înălțime, evidențiind microrelieful și uniformitatea acoperirii; (d) clasificarea tematică a norului de puncte (sol, vegetație, apă), utilizată pentru derivarea DTM și CHM.

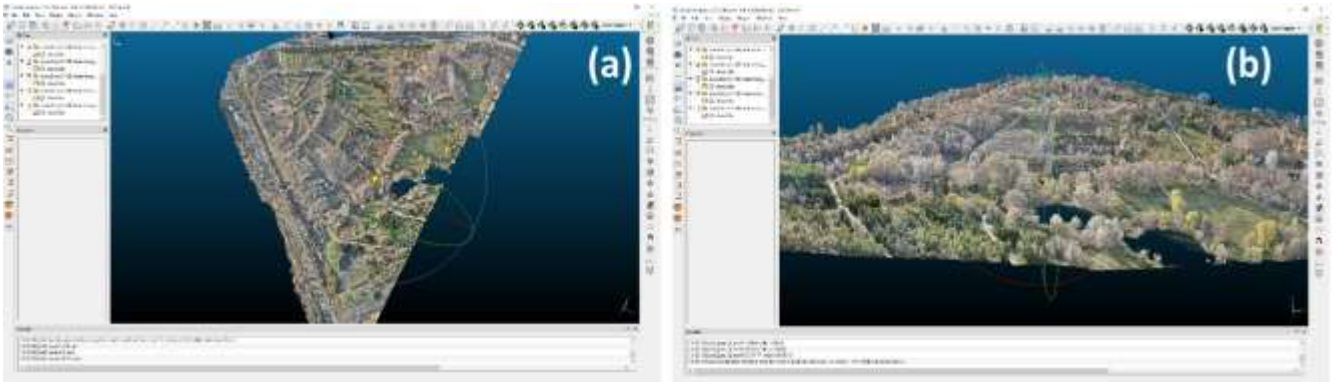
Cele patru imagini din Figură 1 reprezintă principalele produse generate în software-ul **DJI Terra** în urma misiunii UAV realizate cu DJI Matrice 350 RTK echipat cu senzorul LiDAR **Zenmuse L2**. Fiecare figură reflectă un nivel diferit de procesare și interpretare a datelor: generarea ortofotoplanului și vizualizarea traseelor de zbor clasificarea norului de puncte, modelarea altimetrică. Aceste produse sunt esențiale pentru reconstrucția 3D a terenului, a vegetației și a structurii spațiale a sitului studiat, fiind utilizate în numeroase cercetări moderne de teledetecție [13, 14]. Figură 1 (a) reprezintă ortofotoplanul RGB generat prin fotogrammetrie în DJI Terra, deci este o imagine ortorectificată cu rezoluție înaltă, obținută prin prelucrarea imaginilor suprapuse colectate în timpul misiunii UAV, oferind o vedere planimetrică completă a sitului. Ortofotoplanul redă fidel structura peisajului: zonele dendrologice, traseele pietonale, parcelele experimentale, vegetația forestieră și lacurile. Acest produs este esențial pentru validarea modelelor LiDAR, pentru delimitarea exactă a suprafețelor și pentru analize cartografice și peisagistice. Generarea ortofotoplanului pe baza imaginilor RGB este o etapă standard în teledetecție și fotogrammetrie [11, 15], iar DJI Terra urmează aceleași principii de reconstrucție prin matching automat al punctelor cheie. Figură 1(b) ilustrează distribuția benzilor de zbor care au asigurat acoperirea completă a suprafeței Grădinii Botanice Naționale. Traseele oblice contribuie la minimizarea umbrelor vegetale și la obținerea unei densități uniforme a norului de puncte. Conform recomandărilor lui Turner [16], o acoperire optimă este esențială pentru eliminarea golurilor în coronament și pentru obținerea unei reconstrucții 3D robuste. Planificarea zborului este un element-cheie pentru calitatea finală a DTM/DSM/CHM și reflectă precizia cu care DJI Terra gestionează parametrii RTK, altitudinea și suprapunerile. În Figură 1 (c) se văd bine benzile paralele colorate, care sunt dovada suprapunerii corecte a benzilor de zbor LiDAR și reprezintă modul în care fasciculul laser a acoperit uniform situl.

Zonele înalte (portocaliu–roșu) corespund marginii de nord a Grădinii Botanice și zonelor ridicate de pe laturile vestice, în timp ce zonele albastre-verzi reflectă depresiuni locale, luncile și complexul

lacustru. Astfel de modele altimetrice sunt indispensabile pentru analiza geomorfologică și pentru validarea calibrării GNSS/IMU a misiunii UAV. Conform lucrărilor [10, 17], precizia reconstrucției verticale este determinantă pentru calitatea finală a CHM și DSM.

Clasificarea norului de puncte reprezintă unul dintre pașii fundamentali în procesarea datelor LiDAR, permițând separarea suprafeței terenului de elementele suprapuse (vegetatie, clădiri, arbori). În Figură 1 (d), zonele de vegetație înaltă apar dominate de culoarea roșie, indicând densitatea ridicată a coronamentului, în timp ce suprafețele deschise (galben) corespund potecilor, terenurilor agricole, spațiilor experimentale și marginilor infrastructurii. Identificarea precisă a claselor tematice este crucială pentru generarea unui Model Digital al Terenului (DTM) precis, conform recomandărilor internaționale din literatura de specialitate [7, 8]. Totodată, clasificarea permite analiza structurală a vegetației și estimarea înălțimii arborilor prin derivarea CHM (Canopy Height Model).

Aceste patru imagini procesate în DJI Terra demonstrează calitatea ridicată a datelor obținute cu DJI Matrice 350 RTK și senzorul LiDAR Zenmuse L2. Clasificarea norului de puncte, modelele altimetrice, ortofotoplanul și analiza traseelor de zbor constituie împreună fundamentul pentru generarea unui set complet de produse geospațiale utilizate în modelarea terenului, studiul vegetației și evaluarea structurală a coronamentului.



Figură 2. Norul de puncte LiDAR colectat cu DJI Matrice 350 RTK și Zenmuse L2, vizualizat în CloudCompare din perspectivă zenitală (a) și oblică (b).

În Figură 2 (a) este prezentată o vizualizare zenitală (top-down) a norului de puncte LiDAR achiziționat cu Zenmuse L2, colorat cu texturi RGB provenite din imaginile de suprapunere ale senzorului optic integrat. În această reprezentare, CloudCompare afișează distribuția tridimensională a punctelor într-un mod fotorealist, permițând identificarea clară a principalelor componente ale peisajului din Grădina Botanică Națională (Institut) „Alexandru Ciubotaru”. Din această imagine putem distinge foarte bine rețeaua de alei și căi de acces, sub formă de suprafețe liniare deschise, zonele dendrologice și parcelele experimentale, având texturi variabile, coronamentul arborilor, reprezentat dens și omogen în partea centrală și nordică, lacurile din zona central-estică, redate prin zone cu absență de puncte LiDAR (absorbanța totală a fasciculului laser). Densitatea ridicată a punctelor (specifică L2, >200 p/m²) asigură o reprezentare continuă a vegetației și infrastructurii. Vizualizarea zenitală este utilizată în mod obișnuit în analiza stratificării terenului și pentru validarea suprapunerii benzilor LiDAR [18].

Pe când în Figură 2 (b) se oferă o perspectivă oblică, evidențiind structura tridimensională a vegetației și topografia zonei. În această vizualizare, modelul LiDAR colorat RGB permite observarea

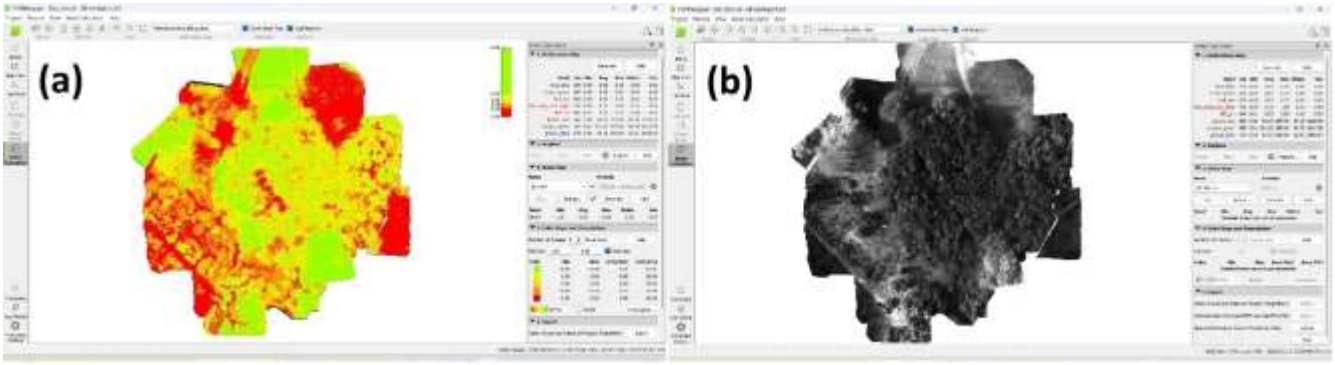
înălțimii arborilor cu diferențe evidente între grupurile de arbori maturi și vegetația tânără, continuității coronamentului prezintă o distribuție densă în centrul sitului și una mai fragmentată spre margini, structura reliefului este cu zone de luncă joasă în jurul lacurilor și terenuri mai ridicate spre periferie, aliniamentele vegetale și aleile sunt vizibile datorită absenței punctelor înspre sol în respectivele zone, iar precizia reconstrucției 3D este demonstrată de contururile clare ale clădirilor și suprafețelor deschise.

Deci putem spune că această vizualizare este esențială pentru analiza volumetrică a vegetației, în special pentru generarea Modelului Înălțimii Coronamentului (CHM) și pentru evaluarea continuității verticale a ecosistemului [1, 13].

Tabel 1. Analiză comparativă între cele două imagini.

Aspect	**Vizualizare zenitală (Fig. 2 (a))**	**Vizualizare zenitală (Fig. 2 (b))**
Scop	Analiză planimetrică, distribuție pe orizontală	Analiză volumetrică, structură verticală
Vizibilitate arbori	Formă în plan, distribuție coronament	Înălțime, volum, stratificare
Relief	Vizibil doar prin variația texturilor	Evidențiat clar prin variația punctelor 3D
Utilitate	DTM, DSM, cartografie	CHM, analiză structurală, modelare 3D

O analiză comparativă detaliată a caracteristicilor vizuale și structurale surprinse în imaginile prezentate în Figură 2 este sintetizată în Tabel 1, unde sunt evidențiate diferențele privind distribuția punctelor LiDAR, reprezentarea topografică și modul de redare a volumetriei vegetației.



Figură 3 Analiza multispectrală realizată în Pix4Dmapper pe baza datelor colectate cu drona DJI Phantom 4 Multispectral: (a) harta NDVI, evidențiind variația vigorii vegetației, (b) reflectanța în banda NIR, utilizată pentru evaluarea densității și sănătății structurale a vegetației.

Pentru analiza vegetativă a unei porțiuni ai Grădinii Botanice Naționale (Institut) „Alexandru Ciubotaru" am efectuat un studiu Figură 3 (a), care reprezintă harta NDVI, generată în Pix4Dmapper prin utilizarea canalelor Red și NIR [19]. Colormap-ul utilizat (RdYlGn) evidențiază variația vigorii vegetației la nivelul zonei analizate din Grădina Botanică Națională (Institut). Aici zonele în roșu indică stare vegetativă slabă, suprafață uscată sau sol expus, zonele în galben sugerează vegetație moderată, corespunzând frecvent vegetației aflate în stres hidric sau în perioadă de tranziție fenologică, iar zonele în verde indică vegetație sănătoasă, cu densitate mare a biomasei și activitate fotosintetică intensă.

Distribuția acestor valori reflectă variabilitatea structurii vegetale, diferențele dintre zonele arborescente, arbustive și ierboase, precum și efectele microclimatice locale.

În Figură 3 (b) este reprezentată reflectanța în infraroșu apropiat, unde vegetația reflectă puternic radiația NIR datorită structurii interne a frunzelor. În această vizualizare, zonele luminoase (alb-gri deschis) indică vegetation densă și sănătoasă, care reflectă eficient radiația NIR, iar zonele întunecate (gri închis–negru) corespund zonelor cu vegetation slabă, sol umed, suprafețe fără vegetație sau umbre.

Imaginea NIR oferă o perspectivă brută asupra capacității vegetației de a reflecta radiația, constituind baza pentru calculul indicilor spectrali precum NDVI, GNDVI sau NDRE.

Tabel 2. Analiză comparativă NDVI vs. NIR

Caracteristică	**NDVI**	**Banda NIR**
Tip informație	Index derivat, normalizat	Reflectanță brută
Sensibilitate	Sensibil la stresul vegetației	Sensibil la densitatea frunzișului
Detectează	Vigor vegetație, stres, degradare	Biomasa, sănătatea structurală
Avantaje	Ușor de interpretat; standard global	Precizie ridicată; date neprocesate
Limitări	Depinde de iluminare și calibrare	Necesită preprocesare suplimentară

În Tabel 2 avem o interpretare clară a celor două imagini, prin care putem spune că zonele cu reflectanță NIR ridicată coincid cu valori NDVI mari, confirmând prezența vegetației sănătoase [20]. Zonele cu reflectanță scăzută sunt asociate cu NDVI redus, corespunzând zonelor afectate de uscăciune, sol expus sau vegetație rară. NDVI amplifică diferențele dintre vegetația sănătoasă și cea degradată, în timp ce NIR arată distribuția brută a reflectanței, utilă pentru analize spectrale suplimentare.

Pe zona studiată, se observă nucleu forestier cu vegetație sănătoasă (valori NDVI ridicate și NIR intens), corespunzând arborilor maturi, iar imagini și fâșii de tranziție cu NDVI redus, sugerează vegetație tânără, rară sau afectată de sezon. Zone cu sol expus și pajiști degradate reprezentate predominant în roșu în NDVI. Aceste informații sunt esențiale pentru monitorizarea stării fitosanitare, detecția stresului hidric, evaluarea biomasei și a acoperirii vegetale, planificarea intervențiilor silvice și ecologice. Analiza DTM-ului derivat din datele LiDAR a evidențiat variații moderate ale altitudinii, cu diferențe de nivel accentuate în special în apropierea taluzurilor și în zona lacurilor. Aceste informații sunt esențiale pentru evaluarea scurgerii de suprafață, a potențialului de eroziune și pentru proiectarea infrastructurii verzi-albastre. Modelul coronamentului (CHM) a permis calculul înălțimii maxime, medii și al distribuției statistice a arborilor pe sectoare. Zonele cu înălțimi maxime corespund plantațiilor dendrologice mature, confirmând importanța acestora pentru stabilitatea ecologică și peisagistică a grădinii. În același timp, sectoarele caracterizate prin înălțimi mici și valori NDVI reduse pot fi identificate ca prioritare pentru lucrări de reîmpădurire, regenerare sau completare a coronamentului.

Integrarea informațiilor LiDAR cu datele fotogrammetrice și multispectrale demonstrează coerența dintre parametrii structurali (înălțime, densitate, volum) și cei funcționali (stare de vegetație, activitate fotosintetică), oferind o imagine holistică asupra ecosistemului urban reprezentat de Grădina Botanică Națională (Institut) ”Alexandru Ciubotaru” [21].

CONCLUZII

Studiul a demonstrat că tehnologia LiDAR montată pe UAV reprezintă un instrument extrem de eficient pentru generarea și evaluarea modelului digital al terenului și al coronamentului arborilor în contexte urbane complexe, precum Grădina Botanică Națională (Institut) ”Alexandru Ciubotaru”.

Norii de puncte de înaltă densitate au permis separarea precisă a solului de vegetație și construcții, precum și derivarea unor produse derivate (DTM, CHM) cu acuratețe ridicată. Rezultatele au evidențiat

zonele cu coronament dezvoltat, asociate valorilor maxime de înălțime și NDVI, dar și sectoarele vulnerabile, unde vegetația este rară sau într-o stare mai puțin favorabilă. Integrarea datelor LiDAR cu modelele fotogrammetrice și cu hărțile NDVI oferă un cadru robust pentru monitorizarea pe termen lung a dinamicii vegetației și a relației dintre frontul urban construit și spațiul verde. Din perspectivă aplicativă, metodologia propusă poate fi transferată către alte parcuri și spații verzi urbane, sprijinind procesele de planificare și management durabil al infrastructurii verzi. În plus, abordarea are un potențial educațional semnificativ, permițând includerea datelor UAV–LiDAR în activități didactice, proiecte de cercetare studențești și programe de formare în domeniul tehnologiilor geospațiale.

REFERINȚE:

1. WALLACE, L., et al. Assessment of forest structure using two UAV techniques: A comparison of airborne laser scanning and structure from motion (SfM) point clouds. In: Forests, 2016, vol. 7, no. 3, p. 62.
2. WHITE, J.C., et al. The utility of image-based point clouds for forest inventory: A comparison with airborne laser scanning. In: Forests, 2013, vol. 4, no. 3, pp. 518-536.
3. IONIȚA, O. et al. Contribuții la studiul speciilor genului hypochoeris l.(asteraceae) în flora republicii moldova. In: CHIŞINĂU 2021, vol. no. p. 74.
4. BORK, E.W, SU Jason G. Integrating LIDAR data and multispectral imagery for enhanced classification of rangeland vegetation: A meta analysis. In: Remote Sensing of Environment, 2007, vol. 111, no. 1, pp. 11-24.
5. MANZONI, Marco, MONTI-GUARNIERI, Andrea, MOLINARI, Monia Elisa. Joint exploitation of spaceborne SAR images and GIS techniques for urban coherent change detection. In: Remote Sensing of Environment, 2021, vol. 253, no. p. 112152.
6. Team Development. CloudCompare Development Team, 2023. In: CloudCompare (Version 2.13), 2023, vol. GPL software, no. p.
7. SITHOLE, G., VOSSELMAN, G. Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds. In: ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, 2004, vol. 59, no. 1-2, pp. 85-101.
8. MENG, X., CURRIT, N., ZHAO, K. Ground filtering algorithms for airborne LiDAR data: A review of critical issues. In: Remote Sensing, 2010, vol. 2, no. 3, pp. 833-860.
9. ZHANG, W, et al. An easy-to-use airborne LiDAR data filtering method based on cloth simulation. In: Remote sensing, 2016, vol. 8, no. 6, p. 501.
10. HYYPPÄ, J., et al. Methods of airborne laser scanning for forest information extraction. in Workshop on 3D remote sensing in forestry, Vienna, Austria. 2006.
11. Pix4D. Pix4Dmapper Technical Documentation.
12. ROUSE, Jr JW, et al. Paper a 20. in Third earth resources technology satellite-1 symposium: The proceedings of a symposium held by Goddard space flight center at Washington, DC on. 1973.
13. HYYPPÄ, J., et al. Review of methods of small-footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests. In: International Journal of Remote Sensing, 2008, vol. 29, no. 5, pp. 1339-1366.
14. VOSSELMan, G., MAAS, Hans-Gerd. Airborne and terrestrial laser scanning. Whittles publishing, 2010.
15. WESTOBY, M. J., et al. 'Structure-from-Motion'photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. In: Geomorphology, 2012, vol. 179, no. pp. 300-314.

16. TURNER, D., LUCIEER, A., WATSON, CH. An automated technique for generating georectified mosaics from ultra-high resolution unmanned aerial vehicle (UAV) imagery, based on structure from motion (SfM) point clouds. In: Remote sensing, 2012, vol. 4, no. 5, pp. 1392-1410.
17. KRAUS, K. Photogrammetry: geometry from images and laser scans. Walter de Gruyter, 2011.
18. COOPS, N.C., et al. Modelling lidar-derived estimates of forest attributes over space and time: A review of approaches and future trends. In: Remote Sensing of Environment, 2021, vol. 260, no. p. 112477.
19. TUCKER, C.J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. In: Remote sensing of Environment, 1979, vol. 8, no. 2, pp. 127-150.
20. MERCHANT, J.W. Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective. In: Cartography and Geographic Information Science, 2000, vol. 27, no. 4, pp. 311-311.
21. BERJÓN, A.J., et al. Retrieval of biophysical vegetation parameters using simultaneous inversion of high resolution remote sensing imagery constrained by a vegetation index. In: Precision Agriculture, 2013, vol. 14, no. 5, pp. 541-557.

Finanțare: Această cercetare a fost finanțată de Ministerul Educației și Cercetării al Republicii Moldova în cadrul subprogramului nr. 011210, „Metode fizice avansate și tehnologii bazate pe UAV pentru monitorizare complexă, evaluare și modelare” și Proiectul Voucher inovațional 3DTur 2024-2025.