



VILNIAUS UNIVERSITETAS
CHEMIJOS IR GEOMOKSLŲ FAKULTETAS
GEOMOKSLŲ INSTITUTAS
KARTOGRAFIJOS IR GEOINFORMATIKOS KATEDRA

Ernestas Dicevičius

Kartografijos magistro studijų programos baigiamasis darbas

**LiDAR DUOMENŲ TAIKYMAS MIŠKOTYROJE (LABANORO-
PABRADĖS GIRIOS PAVYZDŽIU)**

Vilnius, 2022



VILNIAUS UNIVERSITETAS
CHEMIJOS IR GEOMOKSLŲ FAKULTETAS
GEOMOKSLŲ INSTITUTAS
KARTOGRAFIJOS IR GEOINFORMATIKOS KATEDRA

Ernestas Dicevičius

Kartografijos magistro studijų programos baigiamasis darbas

**LIDAR DUOMENŲ TAIKYMAS MIŠKOTYROJE (LABANORO-PABRADĖS
GIROS PAVYZDŽIU)**
**APPLICATION OF LIDAR DATA IN FORESTRY (EXAMPLE OF
LABANORO-PABRADĖ FOREST)**

Darbo vadovas: dr. Linas Bevainis

Leidžiama ginti _____
(parašas)

Darbo įteikimo data _____

Registracijos Nr. _____

Vilnius, 2022

TURINYS

ANOTACIJA.....	4
ĮVADAS.....	5
1. LITERATŪROS IR ANKSTESNIŲ TYRIMŲ APŽVALGA.....	7
1.1. LiDAR istorija ir taikymas.....	7
1.2. Miškotyros samprata.....	16
1.3. Ankstesnių tyrimų apžvalga Lietuvoje.....	20
1.4. Ankstesnių tyrimų apžvalga užsienyje.....	25
2. TYRIMO METODIKA.....	29
2.1. Duomenys, techninė ir programinė įranga.....	29
2.2. Duomenų taikymas miško būklės analizei ir vertinimui.....	31
3. TYRIMO REZULTATAI.....	39
3.1. Miško ploto komponentinis vertinimas, taikant LiDAR duomenis.....	39
3.2. LiDAR duomenų pagrindu sukurto vertinimo modelio verifikavimas.....	57
IŠVADOS.....	64
SANTRAUKA.....	66
SUMMARY.....	67
LITERATŪROS IR INFORMACINIŲ ŠALTINIŲ SĄRAŠAS.....	68
PRIEDAI.....	70

Ernestas Dicevičius. LiDAR duomenų taikymas miškotyroje (Labanoro-Pabradės girios pavyzdžiu).

Magistro darbas. Vilnius: VU. 2022.

Anotacija. Sparčiai populiarėjantis nuotolinių tyrimų vaidmuo gamtiniuose tyrimuose formuoja didelį kiekį skirtingų nuomonių apie jų panaudojimo galimybes. Vienas iš tokių metodų yra LiDAR, kuris skirtas nustatyti diapazonus (kintamą atstumą) siunčiant į analizuojamą objektą ar teritoriją impulsinio lazerio signalą ir matuojant laiką, per kurį atspindėta šviesa grįžta į imtuvą. Darbas yra orientuotas į vieną iš gamtinių tyrimų sričių, kurios kontekste gali būti panaudoti lazerinio skenavimo duomenys – miškotyra. Šio darbo tikslas – įvertinti ir išanalizuoti LiDAR duomenų taikymo galimybes miškotyroje. Darbo tikslo įgyvendinimui suformuluoti šeši uždaviniai: atlikti anksčiau vykdytų panašių tyrimų užsienyje ir Lietuvoje turinio analizę; išskirti pagrindinius miškų būklę įvardijančius komponentus, taikomus miškotyroje; atlikti LiDAR duomenų taikymo galimybių analizę miškų būklę apibūdinančių komponentų išskyrimui; parinkti konkretų miško plotą, kuriame bus pritaikyti LiDAR duomenys miško būklės vertinimui ir apibūdinimui; atlikti konkretaus miško ploto komponentinį vertinimą, taikant LiDAR duomenis; verifikuoti LiDAR ir natūrinių tyrimų duomenis ir parengti taikymo metodiką. Uždavinių įgyvendinimui pasitelkti naujausi Lietuvoje trimačiai lazerinio skenavimo duomenys, atlikta literatūros ir ankstesnių tyrimų apžvalga bei analizė, o rezultatai paremti erdvinės analizės išvadomis bei jų verifikavimu lyginant su išoriniais informaciniais šaltiniais. Atlikus LiDAR duomenų taikymo galimybių miškotyroje vertinimą ir analizę nustatyta, kad komponentinis miško ploto vertinimo modelis, paremtas LiDAR duomenimis, yra vienas patikimiausių nuotolinių tyrimų metodų spręsti kompleksiskus miškotyros uždavinius. Tyrimo metu išskirtos trys pagrindinės miškų būklę įvardijančių komponentų grupės: miško ploto paviršius ir reljefas, miško ploto medžių lajos tankis ir aukštis bei pavienių medžių inventorių ir savybės. Atlikto miško ploto komponentinio vertinimo rezultatai pilnai atitinka numatytuosius, o parengtas miško ploto komponentinio vertinimo erdvinės analizės modelis sujungia aprašytą tyrimo metodiką į vieną visumą ir automatizuoja darbo procesą. Modelis yra pilnai funkcionuojantis ir sprendžia numatytuosius uždavinius.

Tekstas 70 psl., priedai 2 psl., 26 pav., 5 lentelės. Santrauka lietuvių ir anglų kalbomis.

Reikšminiai žodžiai: nuotoliniai tyrimai, miškotyra, LiDAR, lazerinės sistemos.

IVADAS

Nuotoliniai tyrimai yra XXI a. sparčiai populiarėjanti žemės stebėjimo tyrimų sritis, kurios esmė yra fiziškai neprisiliečiant prie žemės paviršiaus rinkti duomenis apie įvairias jo savybes. Vienas iš populiariausių ir plačiausiai naudojamų nuotolinių tyrimų metodų yra žemės stebėjimas iš kosmoso, naudojantis palydovais. Šis metodas leidžia rinkti informaciją apie žemės paviršių ir ant jo vykstančius procesus labai dideliu dažniu ir itin plačiai aprėptimi. (USGS, 2021) Nuotoliniai tyrimai neapsiriboja vien tik didele teritorine aprėptimi ir stebėjimu iš tolimo atstumo, tačiau gali būti ir lokalūs, kuomet analizuojama mažesnė teritorija, turinti tam tikras specifines charakteristikas. Vienas iš tokių nuotolinių tyrimų metodų yra LiDAR (angl. *Light Detection and Ranging*). Šis metodas savo principu skiriasi nuo kitų nuotolinių tyrimų metodų tuo, kad yra naudojama visai kitokio tipo technologija – impulsinis lazeris. LiDAR veikimo principas yra ne fotoaparato jutiklio surenkama atspindėta šviesa, o į žemės paviršių nukreiptų lazerio spindulių sugrįžimo laikas į jo šaltinį. Šiuo atveju, LiDAR technologija leidžia iš karto įvertinti paviršiaus savybes jau trimatėje (3D) erdvėje. Standartinis LiDAR prietaisas savyje turi tris pagrindines dedamąsias: skaitytuvą, lazerį ir GPS imtuvą. (Sharma, 2021)

Tiriama problema: tokio pobūdžio ir tematikos tyrimų, ypač susijusių su LiDAR ir miškotyra, Lietuvoje atlikta nedaug. Todėl, vis dar yra svarbu suprasti šio nuotolinių tyrimų metodo svarbą, galimybes ir pranašumus miškotyroje prieš kitus, tradicinius tyrimų metodus. Nors LiDAR technologija laiko atžvilgiu yra efektyvesnė už tradicinius lauko tyrimus, o kai kuriais atvejais ir tikslesnė, ji vis dar yra labai brangi ir reikalauja specifinių žinių bei techninės ir programinės įrangos. Pagrindinė šios tyrimų srities problema - vieningos nuomonės, dėl galimybių ir pasirinkimo taikyti LiDAR duomenis miškotyroje, nebuvimas. Dėl itin didelės LiDAR technologijos kainos ir reikalingų specifinių žinių, vis dar vyrauja nevieninga nuomonė dėl LiDAR taikymo miškotyroje ir kitose srityse. Užsienyje tyrimai šia tema yra sparčiai vykdomi, kasmet rengiamos publikacijos ir moksliniai straipsniai. Lietuvoje ši tema yra paliečiama itin retai arba apskritai neliečiama. Būtent tyrimų, publikacijų, mokslinių straipsnių bei kitų panašaus pobūdžio išraiškų stoka ir lemia nevieningą nuomonę, taip pat pakankamai siaurą LiDAR technologijos taikymą tam tikrose šalyse, įskaitant ir Lietuvą. Jau esant įvairių užsienio šalių parengtų publikacijų, įrodančių LiDAR technologijos pranašumą prieš kitus, tradicinius tyrimų metodus, atsiranda poreikis skirtingas nuomones suvienyti ir pereiti prie pažangesnio, efektyvesnio tyrimų metodo.

Darbo aktualumas ir naujumas: šiuo metu Lietuvoje dauguma miškotyros uždavinių yra sprendžiami tradicinių lauko tyrimų pagalba - tai užima gerokai daugiau laiko nei didesnė dalis nuotolinių tyrimų metodų siūlomų sprendimų. Nors kai kuriais atvejais, miškotyros uždaviniams spręsti gali būti naudojama ir palydovinių hiperspektrinių duomenų analizės technologija, LiDAR duomenys potencialiai gali pasižymėti didesniu tikslumu ir platesnėmis panaudojimo galimybėmis. Lietuvoje LiDAR technologija yra naudojama tik valstybiniame, išskirtiniais ir retais atvejais, itin lokaliniame lygmenyje. Todėl, šis darbas pasižymi inovatyvumu ir yra naujas nuotolinių tyrimų ir miškotyros sankirtos srityje. LiDAR technologija gali pasiūlyti itin specifinius, kompleksiškus ir technologiškai inovatyvius duomenis, kurie jau yra taikomi įvairiose srityse užsienio šalyse, įskaitant ir miškotyra. Matavimai, duomenų kaupimas ir jų apdorojimas, pasitelkus LiDAR technologiją gali vykti koreliai - taip didinant tyrimų ar stebėjimų efektyvumą bei spartinant jų eigą ir taupant svarbius laiko kaštus. Šio darbo ir jo rezultatų pritaikomumą galima vertinti kaip tiesioginį - tai reiškia, kad darbo rezultatai: parengta metodika, išvalgos ir analizės išvados galėtų būti tiesiogiai panaudotos sprendžiant įvairius miškotyros uždavinius. Kadangi, kaip ir minėta, LiDAR technologijos panaudojimas šioje srityje Lietuvoje vis dar yra gana siauras, tikimasi, kad darbas gali pastūmėti tam tikrus vienetus ar institucijas pereiti prie nuotolinių tyrimų metodų naudojimo savo darbuose. Taip pat, visas darbas arba atskiros jo dalys gali būti panaudoti rengiant naujas metodikas, duomenų technologijų aprašus, vertinant techninės ir programinės įrangos bei tolimesnių tyrimų poreikį.

Tyrimo objektas – LiDAR duomenų taikymo miškotyroje galimybių analizė.

Darbo tikslas – įvertinti ir išanalizuoti LiDAR duomenų taikymo galimybes miškotyroje.

Darbo uždaviniai:

- 1) Atlikti anksčiau vykdytų panašių tyrimų užsienyje ir Lietuvoje turinio analizę;
- 2) Išskirti pagrindinius miškų būklę įvardijančius komponentus, taikomus miškotyroje;
- 3) Atlikti LiDAR duomenų taikymo galimybių analizę miškų būklę apibūdinančių komponentų išskyrimui;
- 4) Parinkti konkretų miško plotą, kuriame bus pritaikyti LiDAR duomenys miško būklės vertinimui ir apibūdinimui;
- 5) Atlikti konkretaus miško ploto komponentinį vertinimą, taikant LiDAR duomenis;
- 6) Verifikuoti LiDAR ir natūrinių tyrimų duomenis ir parengti taikymo metodiką.

1. LITERATŪROS IR ANKSTESNIŲ TYRIMŲ APŽVALGA

1.1. LiDAR istorija ir taikymas

LiDAR technologijos pradžią galima susieti su nuolatinio žmogaus instinktu ir poreikiu, naudojantis savo fiziniais pojūčiais (rega, klausa, lytėjimu ir t.t.), stengtis suprasti ir gilintis į jį supantį pasaulį. Žmonija jau yra panaudojusi garso bangas tam, kad sukurtų garsinę navigacijos nuotolio nustatymo technologiją „SONAR“ ir garso aptikimo bei nuotolio nustatymo technologiją „SODAR“. Tobulėjant elektromagnetinių bangų ir elektroninio valdymo supratimui, pastebėta, kad į sonarą panašius principus galima naudoti ir su radijo bangomis, kuriant radijo aptikimo ir nuotolio nustatymo „RADAR“ sistemas. Galima teigti, kad šios sistemos paverčia akustinę ir radijo erdvę vaizdine erdve, kurią žmonės gali žymiai paprasčiau suvokti. Kitas logiškas žingsnis šioje srityje yra lazerių šviesos naudojimas aptikimui ir diapazonų nustatymui, t. y. LiDAR. Pradedant nuo ištakų, daugybė išradimų yra įgyvendinami dėl žmonijos poreikio išspręsti vieną ar kitą problemą. Broliams Orville'ui ir Wilbur'ui Wright'ams pademonstravus, kad skrydžiai lėktuvu yra įmanomi, daugelis norėjo skristi. Kadangi skrydžiai tapo vis sėkmingesni, buvo galima skristi ilgiau, aukščiau ir greičiau. Visa tai atrodė puiku, tačiau beveik iš karto iškilo problema - kaip nusileisti. Norint saugiai nusileisti, reikia žinoti, kiek toli fiziškai esama nuo žemės paviršiaus. Taigi, kilo klausimas kaip išmatuoti šį atstumą tokiomis sąlygomis, kai žmogaus regėjimas neveiks, ypač esant nepalankioms oro sąlygoms, pavyzdžiui, sniegui arba naktį. Šiuolaikiniai LiDAR jutikliai atstumui iki objekto nustatyti naudoja lazerio spindulį. Šviesos spindulys patenka į objektą ir grįžta atgal į jutiklį. LiDAR jutiklio viduje esantis mikrokompiuteris matuoja laiką, per kurį ši šviesa grįžta į jutiklį. Kadangi jutiklis taip pat žino, kad šviesos greitis yra fiksuotas, jutiklis dabar gali labai tiksliai apskaičiuoti ir pateikti atstumą iki to objekto. LiDAR jutikliai atlieka šiuos matavimus ir skaičiavimus nuo 10 iki 1000 kartų per sekundę. Todėl, pavyzdyje, kai lėktuvas leidžiasi tamsoje, jei LiDAR jutiklis yra sumontuotas lėktuvo apačioje ir nukreiptas į žemę, jutiklis pilotui tiksliai praneš, koku atstumu yra žemė, ir pateiks svarbią informaciją, kurios jam reikia norint saugiai nusileisti. (Young, 2011)

LiDAR yra glaudžiai susijęs su „RADAR“ sistema (radijo aptikimas ir nuotolio nustatymas). Pirmą kartą „RADAR“ buvo sėkmingai pritaikytas 1904 m., kai Christian'as Huelsmeyer'is panaudojo anteną, imtuvą ir siųstuvą tam, kad aptiktų objektus jūroje ir laivai galėtų nesunkiai išvengti susidūrimo su jais. Ankstyvosios „RADAR“ sistemos maksimalus aptikimo atstumas buvo iki 3000 metrų. Pirminė idėja buvo leisti radijo bangų impulsą objekto link, tada išmatuoti atsispindėjusio signalo stiprumą. Šis principas buvo dar labiau patobulintas, atsižvelgiant į siunčiamo signalo antenos

aukštį ir aptikto objekto aukštį, siekiant nustatyti objekto atstumą nuo paties siųstuvo. RADAR sistemos naudoja siaurą radijo bangų impulsą, su tikslu išmatuoti atstumą, kurį reikia įveikti, iki numatyto stebimo objekto. LiDAR šviesos bangas naudoja lygiai taip pat. Pati idėja naudoti šviesos bangą ir matuoti laiką, per kurį banga pasiekia objektą ir atsispindi nuo jo, siekiant išmatuoti kuo tikslesnį atstumą, kilo mokslininkui E. H. Synge, kuris 1930 m. naudojo prožektorius atmosferos reiškiniams tirti. Atmosferos tyrimuose, 1938 m. debesų aukščiui matuoti ir buvo naudojami būtent šviesos impulsai. Lazerio šviesa prieš kitus bangų spektrus yra pranašesnė tuo, kad jos bangos ilgis yra gana trumpas, todėl galima aptikti ar išmatuoti daug mažesnius ir smulkesnius objektus. Būtent todėl LiDAR yra toks populiarus meteorologų tarpe: jis gali matuoti debesis pačiu smulkausiu masteliu: jų daleles ir lietaus darinius. Be to, lazerio šviesos banga yra labai siaura, todėl iš labai didelių atstumų galima pamatyti net mažiausias stebimo objekto ar teritorijos detales. (Young, 2011)

Vykstant sparčiai technologijų plėtrai ir pažangai, didelis dėmesys buvo skirtas ir LiDAR sistemoms, kadangi šalių vyriausybių atstovai pastebėjo didelį technologijos potencialą gynybos srityje, pvz. raketų ar kitų skraidančių objektų nukreipimą. Taip pat, tobulėjant technologijai, mokslininkai galėjo jau nuodugnai ištirti atmosferą, pavyzdžiui, per nuotolį nustatyti oro taršos kiekį itin dideliu tikslumu. Sausumos žemėlapių sudarymas tapo dar labiau prieinama galimybe, kadangi NASA investavo į LiDAR sistemas, kad sudarytų Marso, Merkurijaus ir mėnulio žemėlapius įvairiose žvalgomosiose kelionėse – tai modernizavo kartografiją ir Žemėje. Geologijos, miškų tyrimų mokslų ir okeanografijos atstovai taip pat išsoko į šį traukinį ir net statybos bei architektūros pramonė pradėjo matyti platų LiDAR technologijos panaudojimą. 1960 m. aerokosminės programos pradėjo naudoti LiDAR sistemas kaip pagrindinį įrankį įvairiems matavimams atlikti. Aštuntajame dešimtmetyje NASA naudojo šią lazeriu pagrįstą nuotolinio stebėjimo technologiją kurdama žvalgomuosius erdvėlaivius. Palaipsniui LiDAR taikymas plėtėsi ir toliau, siekiant įvertinti vandenyno vandens ir atmosferos savybes, taip pat ir topografinių žemėlapių sudarymo tikslais. Remiantis LiDAR technologija taip pat buvo tyrinėjami ir ledo sluoksniai bei miškų lajos. Vis dėl to, tik tada, kai GPS (angl. *Global Positioning System*) tapo prieinama viešam naudojimui kartu su inerciniais matavimo prietaisais (angl. *IMU*), devintojo dešimtmečio pabaigoje, LiDAR tapo perspektyvia ir itin tikslia priemone įvairių sričių mokslininkų tyrimams. Dešimtojo dešimtmečio viduryje LiDAR skaitytuvai jau galėjo sukurti 2000 - 25 000 impulsų per sekundę ir daugiausia buvo naudojami topografiniams žemės paviršiaus žemėlapiams sudaryti. Ši technologija, nors ir primityvi, palyginti su šiais dienomis turimomis priemonėmis, padėjo šalių vyriausybėms planuoti kelių infrastruktūrą, o statybos įmonėms – geriausias vietas pastatams statyti, ypač esant nelygiam ir nepalankiam reljefui. (Dong..., 2018)

Kaip ir minėta, LiDAR yra metodas, skirtas nustatyti diapazonus (kintamą atstumą) siunčiant į analizuojamą objektą ar teritoriją impulsinio lazerio signalą ir matuojant laiką, per kurį atspindėta šviesa grįžta į imtuvą. LiDAR technologija taip pat, kaip ir fotogrametrija, gali būti sausumos (angl. *terrestrial*), kada matavimo prietaisas yra sumontuotas ant žemės paviršiaus ir oro (angl. *airborne*), kada matavimo prietaisas montuojamas ant pilotuojamų ar bepiločių orlaivių. Ši technologija gali būti naudojama skaitmeniniam žemės paviršiaus ir vandenyno dugno trimačiam (3D) vaizdui konstruoti, dėl skirtingo lazerio signalo grįžimo trukmės ir kintančio bangos ilgio. Ore sklandantys LiDAR technologijos jutikliai gali atlikti atskirus grįžtamojo ryšio matavimus keliuose fiksuoto laiko intervaluose ir registruoti tik vieną išleistą impulsą arba visą grįžtamojo signalo bangą maždaug 15 cm atstumu. Visa grįžtamojo signalo banga dažniausiai yra naudojama miškininkystėje, o atskiri impulsai naudojami gerokai platesniame veiklų spektre. Lazeriai, kurių bangos ilgiai svyruoja nuo 500-600 nm yra dažniausiai naudojami sausumos LiDAR technologijos, o lazeriai, kurių bangų ilgiai svyruoja nuo 1000 iki 1600 nm yra naudojami oro LiDAR sistemose. Įprasta antžeminė LiDAR sistema susideda iš lazerinio skaitytuvo, matavimo prietaiso, valdymo prietaiso, stebėjimo ir registravimo įrenginių: diferencinės globalios padėties nustatymo sistemos (angl. *DGPS*) ir inercinio matavimo prietaiso (angl. *IMU*). Integruotos *DGPS/IMU* sistemos dar yra vadinamos padėties ir orientacijos sistemomis, kurios leidžia tiksliai atlikti padėties matavimus ilgumos, platumos ir aukščio atžvilgiu bei orientacijos matavimus krypties atžvilgiu. Lazerinio skenavimo modeliai gali būti zigzaginiai, lygiagretūs arba elipsės formos. Remiantis diapazonais ir nuskaitymo kampais, *DGPS* ir *IMU* duomenimis, kalibravimo duomenimis ir montavimo parametrais, surinktus lazerinio skenavimo taškus galima apdoroti ir priskirti jiems (x, y, z) koordinatas atitinkamoje geografinėje koordinatinių sistemoje. LiDAR sistemose yra naudojami tiek impulsiniai, tiek ištisinės bangos lazeriai. Impulsinės LiDAR sistemos matuoja trumpo šviesos impulso iš lazerio į ir atgal laiką iki matavimo tikslo ir atgal į patį imtuvą. LiDAR duomenų tikslumas dažniausiai vertinamas lyginant surinkto taškų debesies atitikimą su kontrolės taškais, išmatuotais standartiniu GPS prietaisu. Pagrindinės tikslumo klaidos, atsirandančios LiDAR duomenyse kyla dėl paties lazerio problemų, problemų su inerciniu navigacijos prietaisu „*INU*“ arba inerciniu matavimo prietaisu „*IMU*“. Didėjant aukščiui iš kurio atliekamas lazerinis skenavimas, mažėja ir gaunamų duomenų tikslumas: jutikliui esant žemiau nei 1200m, paklaida yra iki 15 cm, tarp 1200 ir 2500m – 25 cm. LiDAR taškai, suderinami su geografinėmis informacinėmis sistemomis pateikiami senuoju „*ASCII*“ (x, y, z) koordinatinių formatu arba naujuoju, patobulintu *LAS* formatu, kuris yra gerokai universalesnis ir lengviau suderinamas su įvairiomis programinėmis įrangomis. Jei LiDAR sistema yra integruota kartu su skaitmenine kamera, duomenyse

gali būti talpinamos ir *RGB* spalvų reikšmės, ko pasekoje iš LiDAR taškų debesies galima kurti realybę labiau atitinkančius trimačius (3D) modelius, kadangi kiekvienas LiDAR taškas savyje talpiną skaitmeninės kameros perduotą vieno pikselio *RGB* spalvos reikšmę. (Young, 2011)

LiDAR duomenys yra specifiniai. Kartu su globalios padėties informacija iš GPS prietaiso ir inercinės navigacijos prietaiso „*INU*“, atstumo matavimai yra paverčiami trimačių taškų, kurie apibrėžia atitinkantį objektą ar teritoriją trimatėje erdvėje, matavimus. LiDAR taškų duomenys, įskaitant lazerio laiko diapazoną, lazerio nuskaitymo kampą, GPS padėtį ir *INU* informaciją, yra apdorojami kiek vėliau. Tuomet, duomenys yra sukompiliuojami į labai tikslias georeferencines x, y, z koordinatas, analizuojant lazerio laiko diapazoną, lazerio nuskaitymo kampą, GPS padėtį ir „*INS*“ informaciją. Lazerio impulsai grįžta į jutiklį iš skirtingų atspindinčių paviršių, esančių virš žemės ir ant jos paviršiaus. Vienas skleidžiamas impulsas gali grįžti kaip vienas arba keli atspindžiai. Pirmasis grąžinamas impulsas yra labai svarbus, nes jis žymi aukščiausią arba aukščiausią atspindintį paviršių tašką. Pirmosios grąžos (angl. *first return*) gali apimti medžių viršūnes, pastatų stogus ar transporto priemonių viršūnes. Jei nėra kitų atspindinčių paviršių, vienas pirmasis grąžimas iš karto gali reikšti žemės paviršių. Daugelio tarpinių grąžų debesys leidžia modeliuoti miško lajų, žemės dangą ir kai kurias žmogaus sukurtos infrastruktūros ypatybes. Mažiausia aukščio grąža gali atspindėti žemės medžiagas ir padėti modeliuoti tik žemės paviršių arba reljefą. (Esri, 2018)

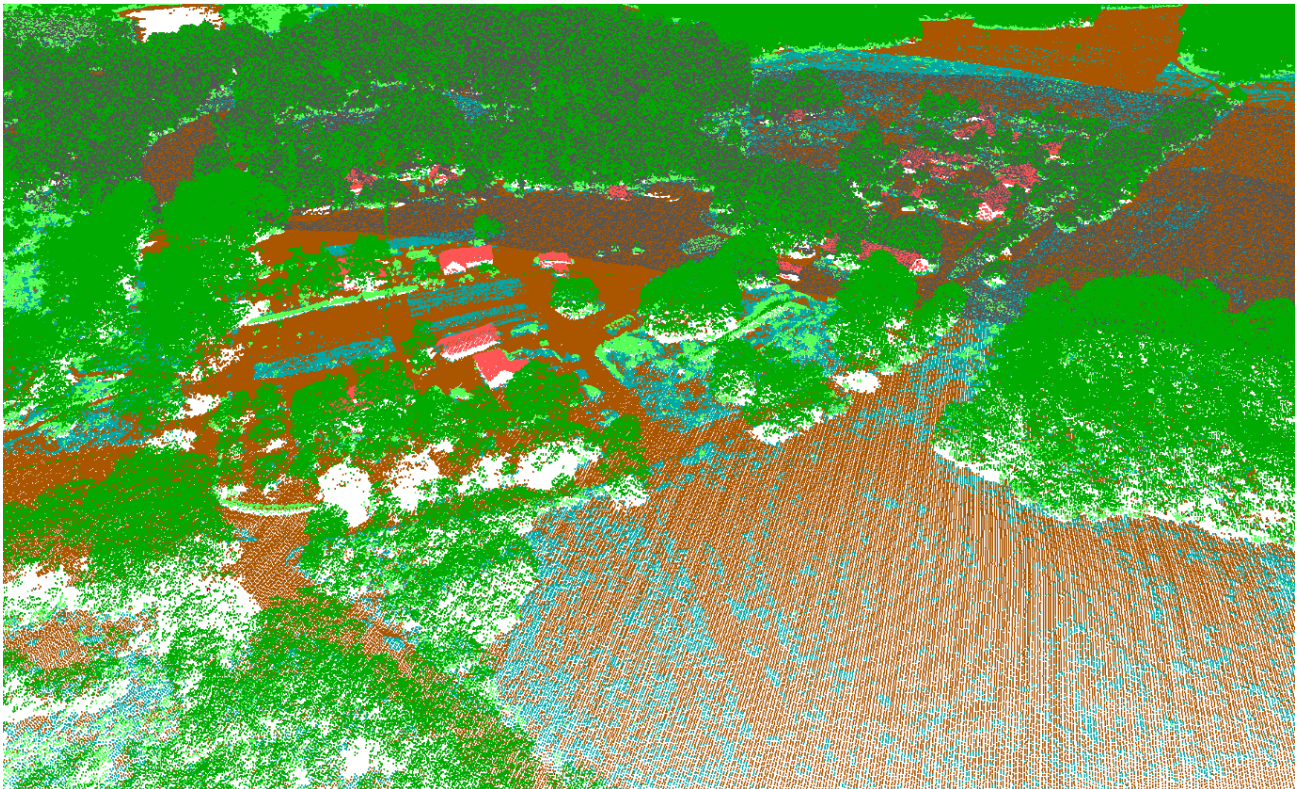
Nesvarbu, ar jie renkami kaip atskiri taškai, ar kaip visa bangos forma, dažniausiai LiDAR duomenys yra prieinami kaip atskiri taškai. Atskirų grąžų LiDAR taškų rinkinys yra žinomas kaip LiDAR taškų debesis (angl. *LiDAR point cloud*). Dažniausiai naudojamas failo formatas LiDAR taškų debesies duomenims saugoti yra „*las*“ formatas, tuo tarpu, „*laz*“ formatas yra labai suglaudinta „*las*“ versija ir tampa vis plačiau panaudojama dėl palankesnių dalinimosi galimybių. Įprasti LiDAR duomenų rinkinių atributai: x, y, z koordinatės, intensyvumas ir klasifikacija. LiDAR duomenų atributai gali skirtis, atsižvelgiant į tai, kaip duomenys buvo renkami ir apdorojami. Taip pat, galima nustatyti, kokie atributai yra prieinami kiekvienam LiDAR taškui, naudojantis duomenų rinkinio metaduomenimis. Visi LiDAR duomenų taškai turės:

- x, y vietos informacija: nustato objekto, nuo kurio atsispindėjo lazerio impulsas (šviesa), x ir y koordinačių vietą.
- z (aukštumos reikšmės): rodo objekto, nuo kurio atsispindėjo lazerio impulsas, aukštį (z koordinatė)

Dauguma LiDAR duomenų rinkinių turės:

- intensyvumas: parodo jutiklio užfiksuotą šviesos energijos kiekį. (Earth Lab, 2020)

Kai kurie LiDAR taškų debesies duomenys taip pat gali būti „išlaptinti“. Klasifikavimas reiškia kiekvieno taško žymėjimą objektu, nuo kurio jis atsispindėjo. Taigi, jei impulsas atsispindi nuo medžio šakos, jis priskiriamas klasei „augmenija“. Jei impulsas atsispindi nuo žemės, jis priskiriamas klasei „žemė“. LiDAR taškinių debesų klasifikavimas yra papildomas apdorojimo žingsnis. Klasifikacija tiesiog parodo objekto tipą, nuo kurio atsispindėjo lazerio grįžtamasis signalas. Kai kurie LiDAR produktai gali būti klasifikuojami kaip „sužeminti / nežeminti“, o kai kurie duomenų rinkiniai bus toliau apdorojami, siekiant nustatyti, kurie taškai atsispindi nuo pastatų ar kitos infrastruktūros. Kai kurie LiDAR duomenų rinkiniai jau gali būti klasifikuojami pagal augmenijos tipą. Pats duomenų produktas yra duomenys, gauti iš prietaiso, arba informacija, surinkta vietoje. Pavyzdžiui, galima išeiti į lauką ir išmatuoti medžių aukštį 20-čiai sklypų, tada apskaičiuoti vidutinį kiekvieno sklypo aukštį. Vidutinė vertė yra išvada iš atskirų matavimų, kurie buvo surinkti lauke. Nagrinėjant jutiklių duomenis, jutikliai dažnai renka duomenis tokiu formatu, kurį reikia apdoroti, kad iš jų būtų gaunamos tinkamos ir suprantamos vertės. (Earth Lab, 2020)



1 pav. Klasifikuotas LiDAR taškų debesis

Pagrindinės LiDAR technologijos taikymo sritys yra trys: a) miškininkystė, b) urbanizuotų teritorijų tyrimai ir c) geomokslai. Miškininkystės atveju, kuomet lazerio siunčiamas impulsas

pasiekia medį, jo energija atsispindi atgal į jutiklį arba išsisklaido ant jo paviršiaus, o likusi energijos dalis prasiskverbia pro plyšius tarp medžio lapų ir šakų. Lazerio impulsui skverbiantis pro plyšius, energija gali būti toliau atspindėta arba išsklaidoma medžių lapų, šakų arba stiebų mažesniuose aukščiuose. Atspindėtos energijos pozicija ir intensyvumas pasiekia maksimumą priklausomai nuo vertikalios ir horizontalios medžio viršūnės struktūros. LiDAR technologija miškininkystės ir augalijos kartografavime yra revoliucinė, nes 1) sugrįžusi energija į lazerį, gali būti iškart panaudojama įvertinti augalijos vertikalią struktūrą ir 2) įprastų optinių ir radarinių nuotolinių jutiklių signalai nėra pakankamai jautrūs vertikalios augalijos struktūros kitimams pastebėti, skirtingai nei LiDAR jutiklio. Informacija, kuri surenkama šia technologija miškininkystėje išsiskiria į dvi pagrindines tyrimų sritis: a) vieno medžio arba b) visos teritorijos. Naudojant LiDAR technologiją dažniausiai yra atliekamas medžių viršūnių paviršiaus aukščio modeliavimas ir kartografavimas. Sukūrus skaitmeninį reljefo modelį (*DEM*), naudojant LiDAR rezultatų filtrą (*ground-return*), naudinga informacija apie vegetacijos aukštį miškingose teritorijose gali būti akimirksniu išvesta atimant pagrindinio skaitmeninio reljefo modelio aukštį nuo kiekvieno taško aukščio – šis procesas vadinamas taškų debesų normalizavimu arba skaitmeninio reljefo modelio filtravimu. Iš normalizuoto taškų debesies, specialistas gali sukurti tam tikros raiškos ir tikslumo rastrinius tinklelius (pvz. 1, 2, 5 m ir t.t) bei suskaičiuoti įvairią statistiką susijusią su medžiais ir vegetacija, pvz. vidutinį ar didžiausią kiekvienos tinklelio lastelės taško aukštį, taip pat jų medianą. Rezultatas – įvairaus tipo vegetacijos aukščio ir struktūros rastriniai dvimačiai (2D) ir trimačiai (3D) modeliai. (Dong..., 2018)

LiDAR technologija taip pat yra plačiai taikoma urbanizuotoje miesto aplinkoje. 2015 metais buvo pateiktos pagrindinės LiDAR taikymo sritys: 1) miesto morfologija ir žalioji analizė, 2) miesto potvynių rizikos modeliavimas, 3) elektros linijų tinklo modeliavimas, 4) oro uostų GPS signalo klaidų modeliavimas ir 5) saulės skleidžiamos spinduliuotės analizė. Kitos LiDAR taikymo sritys miesto aplinkoje gali būti pastatų modeliavimas, kelių modeliavimas, nepralaidžių paviršių modeliavimas, populiacijos vertinimas, pokyčių stebėjimas, pastatų ir kelių žalos po žemės drebėjimų vertinimas. Kelių modeliavimas trimatėje (3D) erdvėje iš skaitmeninių vaizdų per pastaruosius du dešimtmečius susilaukė didelio susidomėjimo. Pilnai automatizuotas kelių modeliavimas miesto teritorijose gali būti sudėtingas, o rankinė kelių skaitmenizacija trimatėje (3D) erdvėje užtrukę labai ilgai. Daugeliu atvejų, remiantis LiDAR technologija, gali būti įgyvendinamas pusiau automatizuotas kelių tiesimo būdas pagerinant plėtros efektyvumą, tikslumą ir sumažinant proceso ekonominius kaštus. Pastatų trimatė (3D) rekonstrukcija, didėjant aukštos raiškos palydovinių vaizdų ir LiDAR technologijos duomenų prieinamumui pastaraisiais metais taip pat tapo reikšminga tyrimų sritimi.

Didėjant trimačių (3D) miesto modelių poreikiui, pastatų rekonstrukcijos procesai sulaukė didelio dėmesio, todėl LiDAR technologija yra vienas iš sprendimų modeliuojant miesto pastatų infrastruktūrą. Remiantis LiDAR technologija, efektyviai ir nesudėtingai gali būti stebimi ir miestų aplinkos pokyčiai. Skirtingais laikotarpiais atliktų matavimų duomenys panaudojami rekonstruojant miesto aplinką tiek dvimatėje (2D), tiek trimatėje (3D) erdvėje. Skirtingų laikotarpių modeliai yra lyginami, išryškinamos, analizuojamos ir vertinamos besikeičiančios miestų aplinkos teritorijos. (Dong..., 2018)

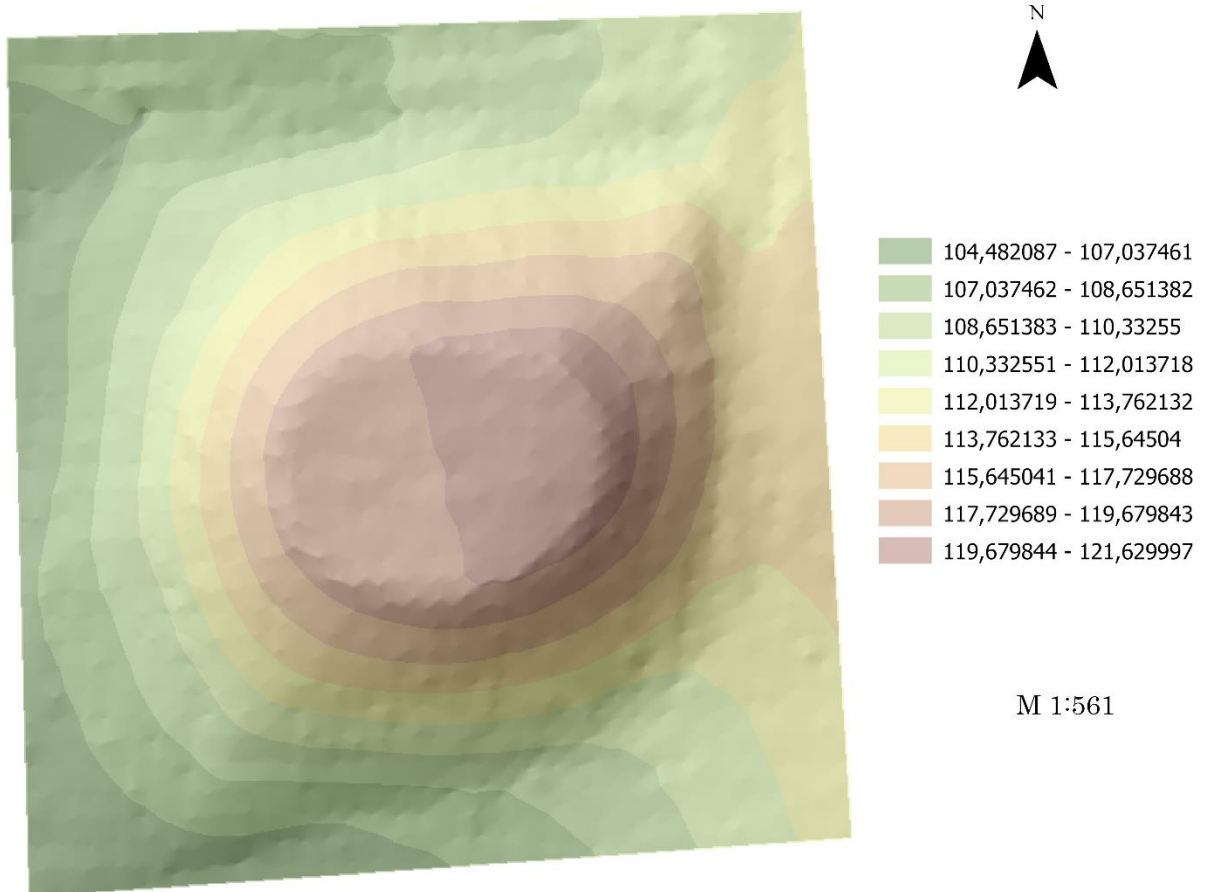
Viena iš populiariausių sričių, kurioje taikoma LiDAR technologija yra geomokslai. Kadangi LiDAR technologija dažnai yra naudojama kuriant skaitmeninius žemės paviršiaus ir reljefo modelius, ji neretai yra lyginama su fotogrametrijos metodu dėl panašių savybių ir gaunamų rezultatų. Be skaitmeninių žemės paviršiaus ir reljefo modelių, LiDAR technologija taip pat plačiai taikoma stebint, analizuojant ir vertinant įvairaus tipo reljefo formas: eolines, fluvialines ir vulkanines, taip pat tektonines sritis, žemės paviršiaus hidrologiją bei paviršiaus litologiją ir geologinę struktūrą. Panašiai kaip ir stebint pokyčius miestų teritorijose, LiDAR technologija taip pat naudojama stebint natūralių gamtinių paviršių pokyčius. Vienas dinamiškiausių reljefo formų pasaulyje – kopas, dėl jų specifikos ir tendencijos migruoti, mokslininkai dažnai stebi ir analizuoja remdamiesi šia technologija. Šis metodas leidžia įvertinti eolinių paviršių tiek kiekybines, tiek kokybines charakteristikas ir pastebėti aiškias tendencijas, geriau suprasti jose vykstančius procesus ir kopas kartografuoti. Paviršiaus hidrologijos srityje LiDAR technologija yra taikoma modeliuojant ir rekonstruojant upių slėnių modelius. Panašiai, kaip ir kopų atveju, čia stebimi pokyčiai, daromi upės tekmės, taip pat numatomos ateities perspektyvos ir tendencijos. Kadangi LiDAR lazeris gali prasiskverbti ir pro žemės paviršius, kartais ši technologija gali būti panaudota ir archeologijoje, kai atliekant teritorinius lazerinio skenavimo matavimus yra pastebimos po žeme esančios struktūros ar pavieniai objektai. LiDAR technologija taip pat gali būti panaudota siekiant aptikti kitais nuotolinių tyrimų metodais nepastebimas istorines geomorfines struktūras, kurios leidžia geriau suprasti Žemės plokščių tektoniką. (Dong..., 2018)

Be jau išvardintų pagrindinių LiDAR technologijos taikymo sričių, gaunami trimačiai duomenys taip pat taikomi ir įvairiose kitose, kartais netradicinėse, srityse. Pavyzdžiui, užsienio šalyse, LiDAR technologija gali būti naudojama siekiant surasti prarastus, buvusius miestus po žeme, atskleidžiant subtilius linijinius žemės pakilimus ir išraižymus. Būtent tankus LiDAR taškų debesis leidžia mums pamatyti po žeme esančius archeologinius artefaktus. Priešingu atveju, pavyzdžiui, naudojant kitus nuotolinių tyrimų metodus, jie būtų uždengiami miškų ir paslėpti nuo plikos žmogaus

akies. LiDAR duomenys taip pat gali būti naudojami ir pastatų kokybės vertinimui. Pastato nuskaitymas su LiDAR leidžia užtikrinti statybos atitikimą pastato informacijos modeliavimui (angl. *BIM*). Taškinio debesies iš antžeminio skenavimo suderinimas su „*BIM*“ projektu užtikrina statybos kokybę ir darbų eigą pagal grafiką. Didžiausias pranašumas yra tai, kaip nuskaitymas realiuoju laiku gali aptikti tam tikrus statinio defektus dar projekto pradžioje. Priešingu atveju būtų prarastas laikas ir pinigai, norint perdaryti bet kokią neteisingai įrengtą ar sugedusią konstrukciją. Povandeniniams tyrimams paprastai yra naudojamas batimetrijos zondavimas (arba sonaras). Sonaras skleidžia garsus ir klausosi aido. Panašiai kaip LiDAR, jis apskaičiuoja atstumą, matuodamas praėjusį aido laiką. Batimetrinis LiDAR skiriasi nuo ore sklindančio LiDAR, nes jame naudojamas žalias (angl. *raw*) bangos ilgis. Naudojant tokio tipo bangos ilgį, povandeninis žemėlapis gali išsiplėsti net iki pat jūros dugno. Ūkininkai, kurie taiko tiksliąją žemdirbystę tam, kad galėtų sumažinti lauke išberiamų trąšų kiekį, yra tik viena iš daugelio GIS taikomųjų programų tikslinių grupių žemės ūkyje. Kadangi purškimas priklauso nuo vietos, galima sutaupyti nemažai pinigų sąnaudoms. Čia galima išskirti LiDAR taikymą ir galimybes - pritvirtinus LiDAR prietaisą prie traktoriaus, jie tiksliai matuoja biomase, aukščius ir tūrius. To rezultatas yra tiksliai ir taupiai paskirstytos trąšos ten, kur jų reikia labiausiai. Savarankiškai važiuojantys automobiliai naudoja 360° automobilinius LiDAR jutiklius, sumontuotus ant transporto priemonės tam, kad gautų visą jos aplinkos perspektyvą. Kiekvienam judesiu automobilis nuolatos ieško kliūčių ir saugumo trikdžių. Pavyzdžiui, „*Velodyne LiDAR*“ yra populiarus 3D vaizdavimo autonominėse transporto priemonėse modelis. Tokias sistemas naudoja šiandien itin populiarūs automobilių „*Tesla*“, „*Lexus*“ ir kt. gamintojai. Naudojant plikus „*raw*“ žemės taškus iš LiDAR sistemų, hidrologai kuria skaitmeninius aukščio modelius. Iš čia, potvynių modeliotojai gali nustatyti zonas, kuriose gali kilti potvynis, prieš tam realiai įvykstant. Šiuo atžvilgiu, LiDAR gali suteikti išankstinio įspėjimo apie potvynius sistemas. Kriminalistikoje LiDAR sistemos itin susiaurina dingusio ar nepažymėto kapo paiešką. Panašiai kaip archeologija, LiDAR gali aptikti subtilias reljefo anomalijas žemėje. Šios anomalijos yra galimos vietos, kur būtų randamas palaidotas kūnas. LiDAR taip pat yra integruotas į nusikaltimo vietos rekonstrukciją, kad būtų galima nuskaityti ir skaitmenizuoti įvairių nusikaltimų ar autoįvykių vietas. Esant nuošliaužoms, LiDAR skenavimas geriau atvaizduoja paviršių augmenijose. Iš šešėliuoto reljefo, nuolydžio ir topografinių kontūrų galima nustatyti nuošliaužoms būdingus morfologinius požymius. Būtent šiose gausiai apaugusiose ir kalvotose vietovėse topografai kuria nuošliaužų inventorių. Apskritai, toks modelis gali numatyti nuošliaužų įvykius ir geriau įvertinti saugumo rizikas. Atmosferos tyrimams yra sukurta net keletas metodų taikyti LiDAR: Doplerio LiDAR – vietoj Doplerio radaro ši technika, naudojant

šviesą, matuoja vėjo greitį. Raman LiDAR – vandens garų ir aerozolių matavimas. Diferencialinė absorbcija LiDAR (angl. *DIAL*) – ozono ir vandens garų matavimai. (GISGeography, 2022)

Kalbant apie vietines ir pasaulines aplinkos problemas, nuotolinio aplinkos stebėjimo pagalba stengiamasi įveikti įvairius atmosferos pokyčius. Miestai naudoja mobilųjį LiDAR turtui valdyti ir saugos standartams užtikrinti bei apima beveik viską – nuo duobių, kelio sąlygų, tiltų pažeidimų, komunalinių paslaugų, reklaminių stendų ir gatvių ženklų. Surinkus nuskaitytus LiDAR duomenis, jie nukreipiami į atitinkamas geoerdvines duomenų bazines. Tokiu būdu galima saugoti, analizuoti ir vizualizuoti kiekvieną infrastruktūros turtą – tai pagrindinė geografinės informacijos sistemos (GIS) funkcija. Kadangi LiDAR taikymas vis plečiasi į įvairias studijų sritis, sniego gylio kriosferoje matavimai taip pat tapo vienu iš dėmesio centrų. Kadangi sniegas turi didelę tūrinę sklaidą, įvairaus ilgio šviesos bangos gali prasiskverbti į skirtingo lygio gylius. Patobulinus šio tipo LiDAR modeliavimą, jis gali būti naudingas hidrologijoje ir prognozuojant sniego lavinas. Kadangi LiDAR tampa vis labiau paplitęs ir išmaniuosiuose telefonuose, integracija į kompiuterinius ar mobiliuosius žaidimus dabar tampa realybe. Papildyta realybė (angl. *augmented reality*) - tai technologija, kuri leidžia bendrauti su išoriniu pasauliu naudojant išmaniojo telefono ekraną, LiDAR čia prideda gylio jutimą tam įgyvendinti. Tai taikoma ne tik žaidimams, tačiau ir perdavimo bokštų, vėjo turbinų ir saulės baterijų išdėstymui. Norint teisingai valdyti tokią infrastruktūrą, LiDAR gali pasitarnauti atskleidžiant įvairias medžių charakteristikas, kurios gali sukelti perdavimo linijų sistemų sutrikimus. Naudojant tankių LiDAR duomenų taškų debesų klasifikaciją, jis atskiria viršutinę medžių lają ir vidutinio ar pačio aukščiausio lygio augmeniją. Tai taip pat gali padėti sumažinti riziką, kai žuvę ar mirštantys medžiai nukris į netoliese esančias perdavimo linijas, taip jas pažeisdami. Keletas labai specifinių ir tikslingų LiDAR taikymo pavyzdžių: kariuomenė, naudojanti orlaivį su LiDAR sistema tam, kad nustatytų mūšio lauko reljefą ir galėtų planuoti apžvalgos aikštelių išdėstymą. Mėnulio topografijoje NASA panaudojo LiDAR dar 1971 m., kad įvertintų Mėnulio paviršiaus aukštį. Geologai LiDAR naudoja matuodami ir suplanuodami nuolydžio, krypties ir aukščio skirtumus bei tyrinėdami žemės paviršiaus formas. Pakrantės erozijos atveju – atlikdami laikinus tyrimus palei kranto linijas - taip galima kiekybiškai įvertinti erozijos mastą potvynių kontekste. Bendrai, LiDAR technologijos pritaikomumo galimybės plečiasi beveik kiekvieną dieną, todėl jau dabar įvertinti pilną šios technologijos pritaikymo galimybių spektrą yra pakankamai sunku. (Acroname, 2020)



2 pav. Skaitmeninis reljefo modelis, sugeneruotas naudojant LiDAR taškų debesį

1.2. Miškotyros samprata

Lietuviškas miškotyros apibrėžimas kiek skiriasi nuo vyraujančio užsienyje, ypač anglų k., naudojamo apibrėžimo. Lietuvoje miškotyra yra apibrėžiama siauriau, t. y. labiau į miško ekologiją orientuota mokslo tyrimų šaka ir kaip miškininkystės dalis. Nėra itin aiškių apibrėžimų, kurie tiksliai įvardytų kas yra miškotyra ir kokie jos objektai, tyrimų sritys ir komponentai. Tuo tarpu miškotyra užsienyje, ypač anglų k. naudojančių šalių kontekste reiškia miškininkystę bendrai ir yra skaidoma į skirtingas miškotyros sritis, pvz. ekologiją, inventorizaciją ir t. t. Šiame darbe labiau orientuojamasi į lietuvišką apibrėžimą, t.y. ekologinę pusę, tačiau taip pat remiantis ir užsienio literatūra bei išvalgomis. Čia vis dėl to, visas dėmesys skiriamas labiau ne ekonominiams ar kitiems su miškais susijusiems aspektams, tačiau labiau ekologiniams, t. y. miškų būklę apibūdinantiems. Pats tiksliausias ir aiškiausias miškotyros apibrėžimas randamas: miškininkystės mokslo kryptis, nagrinėjanti miškų pagrindus, metodus, procedūras, priemones ir savybes, medžių ir medynų augimo sąlygas, miško sodinimo ir naudojimo būdus, miškų ūkio organizavimo procedūras. Miškininkystės

tyrimų objektai yra miško ekologija, miškininkystė, miškų plėtra, medienos naudojimas, miško ekonomika ir politika. Dėl gamtinių sąlygų įvairovės ir su tuo susijusių miškotvarkos ypatybių susiformavo spygliuočių miškai, pievų miškai, kalnų miškai. Svarbiausi miškininkystės arba miškotyros klausimai: medžiagų ir energijos apykaita miškuose, medžių ir medynų biologinės savybės, jų formavimosi dėsniai, miško tipologija, zoniškumas, rūšių kaita, miškų zonavimas, kartografija, miškotvarka ir miškotvarka, miškininkystės mokslinis pagrindas. (Mažeika, 2009) Tuo tarpu, užsienio literatūroje išskiriamas gerokai bendresnis apibrėžimas tyrimų sričiai, susijusiai su miškais: miškininkystė, miškingos žemės valdymas, kartu su susijusiais vandenimis ir dykvietėmis, visų pirma skirtu medienos ruošai. Daugeliu atvejų šiuolaikinė miškininkystė vystėsi lygiagrečiai su gamtos išteklių valdymu. Todėl profesionalūs miškininkai vis dažniau įtraukia į veiklą, susijusią su dirvožemio, vandens ir laukinės gamtos išteklių apsauga bei rekreacija. Miškotyros apibrėžimo kontekste dažnai atsekama miškininkystės istorija nuo jos atsiradimo senovėje iki mokslo profesijos raidos šiuolaikiniame pasaulyje, išsamiai aptariamos miškų rūšys ir paplitimas bei pagrindiniai šiuolaikinio miškotvarkos būdai ir metodai. (Pope, 2020)

Kadangi planetos gyventojų skaičius jau dabar viršija 7 milijardus, didėja ir susirūpinimas dėl pasaulio miškų ir kitų su jais susijusių gamtinių išteklių. Šių natūraliųjų išteklių vaidmuo mūsų gyvenime toliau vystosi kartu su žmogaus raida ir besiplečiančiu pasaulinio kraštovaizdžio komponentų panaudojimu. Anksčiau suvoktą kaip kliūčių urbanizacijai ir plėtrai, miškų svarba įvairioms kultūroms ir daugelis jų teikiamų produktų dabar yra vertinami gerokai palankiau nei anksčiau. Pagrindinis dėmesys, kuris šiandieninių žemėtvarkos specialistų vis labiau sutelkiamas, yra į didėjančius žmonijos poreikius, ir kaip, bent jau kai kurie iš jų, galėtų būti patenkinami neišsekinant planetos natūraliųjų išteklių. Sveiki miškai būtini ne tik suteikiant galimybes ateities kartoms, bet ir siekiant išlaikyti biologinę įvairovę, užtikrinti rūšių išlikimą, patenkinant žmogaus vartojimo poreikius ir sprendžiant nacionalinio saugumo klausimus. Miškų ir gamtos išteklių tvarkymas reikalauja žinių, kurios apjungia tokias disciplinas kaip antropologija, biologija, verslas, chemija, ekologija, ekonomika, inžinerija, entomologija, geografija, geologija, istorija, hidrologija, matematika, fizika, psichologija, ir sociologija. Miškų ekosistemos pateko į šiandienos pasaulinių diskusijų dėmesio centrą dėl didėjančios anglies dioksido koncentracijos, klimato kaitos ir biologinei įvairovei kylančių grėsmių. Vis labiau suvokiant miškų vaidmenį pasauliniame anglies apytakos ciklo kontekste, atsižvelgta į galimybę sumažinti anglies emisiją ir didinti anglies sekvestraciją per miško augimo procesus. Miškai ne tik reprezentuoja daugelį pačių įvairiausių ekosistemų planetoje, tačiau jie taip pat tarnauja ir kaip prieglobstis daugeliui rūšių ir užtikrina pragyvenimą ir užimtumą didelei

daliai gyventojų. Miškai taip pat simbolizuoja ir daug jau įprastų būdingų vertybių (t. y. estetinių ar religinių), kurios yra svarbios daugeliui gyventojų aplink pasaulį. (Schauberger, 2000)

Užsienio literatūroje, pavyzdžiui pagal Jungtinių Amerikos Valstijų miškininkų draugiją, miškininkystė arba miškotyra apibrėžiama kaip „profesija, apimanti mokslą, meną ir praktiką kurti, tvarkyti, naudoti ir išsaugoti miškus bei susijusius išteklius žmonių naudai ir tvariais būdas pasiekti norimus tikslus, poreikius bei išsaugoti vertybes“. Taigi miškotyra yra menas, mokslas, ir miškų tvarkymo verslas, siekiant įvairių tikslų, kurie vyrauja nuo medienos gamybos iki ekosistemų paslaugos. Iš šio apibrėžimo gali atrodyti, kad gamtos išteklių valdymas yra gerokai platesnio spektro veikla nei miškotyra, tačiau miškai yra tiesioginiai gamtos ištekliai, ir miškininkystė pabrėžia jų valdymą siekiant juos išsaugoti, o išsaugojimo ir vartojimo tikslus, apibrėžia patys žmonės. Šie tikslai gali varijuoti nuo medienos produktų tiekimo, laukinės gamtos buveinių vystymo, vandens kokybės palaikymo ir gerinimo bei anglies dioksido iš atmosferos sekvestravimo. Kitaip tariant, miškininkystė gali apimti gamtos išteklių tvarkymą, nuo šių išteklių atskiriant ir pačius medžius. Abi šios tyrimų sritys, jei yra daroma išvada, kad jos yra skirtingos, vis dar turi ir labai daug bendrų charakteristikų. Pavyzdžiui, abi sritys apima plataus spektro miškų valdymo principus, kurie remiasi ekonomika ir ekologija, taip pat apima veiksmus, kurie gali būti taikomi įvairiuose erdviniuose ir laiko masteliuose. Abi tyrimų sritys taip pat apima ir išteklių valdymo kompromisų alternatyvas, kurios būdingos planavime, organizavime, įstatymų kūrime ir viešųjų ryšių veikloje. Miškotyra paprastai skiriasi nuo arboristikos tuo, kad pirmoji mokslo šaka yra labiau susijusi su miškų masyvais, o pastaroji - su pavieniais medžiais. Urbanizuotų teritorijų miškotyros koncepcijos, atrodo, dabar užpildo atotrūkį tarp didelių miškų masyvų ir pavienių medžių tvarkymo. Plačiąja prasme, miškotyros ir gamtos išteklių valdymas gali būti panaudojamas žemėtvarkos uždaviniui, tenkinančių įvairius žmonių ar kitų rūšių poreikius, sprendimui bei gali būti vertinami kaip kompetencijos sritys specialistų, kurie turi atlikti atitinkamus veiksmus, būtinus išsaugoti ir sustiprinti biologinę įvairovę bei ekosistemose vykstančius procesus. Nors tai atrodo visa apimanti mokslinių tyrimų sritis, nebūtinai taip iš tikrųjų yra, kadangi miškų ir gamtos išteklių valdymo praktika skirtinguose regionuose skiriasi dėl skirtingų socialinių ir ekonominių sąlygų bei skirtingų politinių režimų. Be to, tikslai ir apribojimai miškų ir gamtos išteklių valdyme gali keistis keičiantis atitinkamo žemės ploto savininkui, žemėtvarkos organizacijai arba šalies vyriausybei, į kitas. Dėl to, dažniausiai pastebima, kad tam tikri ištekliai yra tvarkomi vienam konkrečiam tikslui, pavyzdžiui, medienos gamybai, rekreacijai arba miško buveinių puoselėjimui, tuo tarpu kiti ištekliai tvarkomi įvairiais, bendrais tikslais, pavyzdžiui, siekiant gauti tam tikrą pajamų kiekį, kartu gerinant ir laukinės gamtos buveinių kokybę bei rekreacinių galimybių

suteikimą. Nors kai kurie tokią idėją gali laikyti prieštaringa ar neteisinga, miškotyra vis dėl to apima ir miškų naudojimą, ir išsaugojimą - tai buvo pabrėžta mokslininko Gifford Pinchot dar 1905 m., daugiau nei prieš 100 metų. Galima pastebėti, kad, aiškios ribos, bent jau užsienio literatūroje, pastebėti tarp skirtingų tyrimų srities apibrėžimų, yra beveik neįmanoma. (Grebner..., 2014) Užsienyje miškotyra dažniausiai yra laikoma bendrojo (angl. *forestry*) apibrėžimo smulkesne dalimi. Tuo tarpu lietuvių literatūroje, miškotyra išskiriama kaip miškininkystės dalis. Dėl šios priežasties, šiame darbe vartojamos tokios sąvokos kaip „miškininkystė“, „miškotyra“ ar „miškotvarka“, galima sakyti, reiškia vieną ir tą patį – miškotyra. Kadangi, kaip ir minėta, yra remiamasi labiau lietuvišku apibrėžimu bei orientuojamasi į esminę jo dalį – „medžių ir medynų augimo sąlygas“, kuri, bent jau iš pirmo žvilgsnio, atrodo geriausiai apibūdina tyrimo eigą ir tikslą.

Nuo devintojo dešimtmečio pradžios jau panaudota nemažai GIS programinės įrangos sprendimų natūraliųjų išteklių tvarkymo tikslais, įskaitant ir sukurtus „ESRI“ (angl. *Environmental Systems Research Institute*), „Intergraph Corporation“ ir „MapInfo“. „ArcGIS“, kuris yra „ESRI“ produktas, yra bene plačiausiai naudojama GIS gamtos išteklių valdymo programinė įranga, nors kai kurios organizacijos Šiaurės Amerikoje taip pat turi prieigą ir prie tokių mažiau žinomų programinių įrangų kaip „Erdas Imagine“, „GRASS“, „Idrisi“, „MapInfo“ ar kitos komercinės bei patentuotos sistemos, o tuo tarpu, „SuperMap“ yra kompiuterinė programa, plačiai naudojama Kinijoje. GIS yra plačiai taikomas gamtos išteklių tvarkyme, ir šviežiai baigę miškotyros ar gamtos išteklių tvarkymo studijas būsimi specialistai, tikimasi, kad bent jau teoriškai šiuos įrankius gali efektyviai valdyti. Nuo tada, kai de Steiguer ir Giles 1981 m. pirmą kartą aprašė galimas GIS panaudojimą miškotyroje ir gamtos išteklių tvarkyme, bendra koncepcija ir principai itin nepasikeitė. Miškininkų, miškotyryninkų ir gamtos išteklių tvarkytojų ir dabar dažnai prašoma nustatyti bei kartografuoti svarbias miškų gaisrų praktikas, miškų hidrografines sistemas, medienos inventorizaciją, urbanizuotų teritorijų miškų plotus, laukinės gamtos ir vandens telkinių buveinių plotus bei kitas natūralaus ir antropogeninio kraštovaizdžio ypatybes. Sprendžiant tokius uždavinius, gali prireikti analizuoti ir pateikti išvadas apie specifinių teritorinių vienetų struktūrinės sąlygas, taip pat parengti alternatyvius planus ir, prireikus, įvertinti tolimesnių veiksmų efektyvumą ir padarinius. Nors kai kurie su natūraliųjų išteklių tvarkymu susiję žemėlapiai vis tiek gali būti piešti rankomis, kompiuterizuotos kartografavimo sistemos palengvina ir pagreitina daugelio gamtos išteklių tvarkymo klausimų analizę ir leidžia kurti profesionalius žemėlapius gamtos išteklių tvarkymo tikslais. (Grebner..., 2014)

1.3. Ankstesnių tyrimų apžvalga Lietuvoje

Bikuvienė I. 2012. Miškų inventorizacijos teorinis ir praktinis tobulinimas, naudojant lazerinį skenavimą. Akademija. /Daktaro disertacija/

Moksliniame straipsnyje, kaip pagrindinis informacijos apie miškus šaltinis išskiriama miškų inventorizacijos kryptis: duomenys apie medienos išteklius, medynų būklę, miško ploto pokyčius, rekreacinius miško išteklius ir pan. Pagrindinis dėmesys miškų inventorizacijos atžvilgiu teikiamas surinktos informacijos tikslumui, kaip pavyzdžiui, praktikoje taikomų inventorizavimo metodų rezultatai. Pastaraisiais dešimtmečiais technologijos, susijusios su erdvinės informacijos gavimu miškų būklei vertinti vystėsi labai greitai. Tai apima miško ribų inventorizacijos lauko darbų aikštelėse nustatymą, geografinės padėties nustatymo įrenginius, elektroninius pavienių medžių matavimo duomenų registravimo prietaisus, lauko kompiuterius su naudojamos automatinio duomenų perdavimo galimybėmis ir kt. Didėjančią svarbą atliekant miškų inventorizaciją įgyja nuotoliniai stebėjimo metodai ir, visai neseniai, lazerinis skenavimas, atliekamas iš orlaivio, kuris turi ypač didelį tikslumą, remiantis matavimo duomenimis. Ši disertacija apibendrina metodo vystymąsi nuo 2006 m., kuriuo buvo siekiama integruoti lazerinio skenavimo technologiją į lietuvių kalbą miškų inventorizacijos tema. Duomenų analizė čia atlikta dviem etapais:

Pirmiausia, žemės paviršiaus nustatymo tikslumo mišku apaugusiose vietose tyrimas. Žemės paviršiaus ir miško įtakos nustatymo tikslumas bei jame esančios charakteristikos buvo įvertintos analizuojamuose etaloniniuose sklypuose. Papildant šiuos matavimus, atlikti geodeziniai matavimai, siekiant apibrėžti sklypo centro aukštį, kuris iš pradžių buvo laikomas etalonu, išreiškiantis tikslų paviršiaus aukštį virš jūros lygio. Lazerinis taškinis debesis buvo sugeneruotas kaip Axelsson'o klasifikuoti paryškiniavimo taškai, vaizduojantys žemės paviršių algoritmo principu, kuris įdiegtas „TerraScan“ programinėje įrangoje. Remiantis šiais parametrais, visų LiDAR debesų taškų, klasifikuojamų kaip žemės paviršius ir esančių viduje 12,62 m nuo analizuojamo sklypo centro buvo nustatyta: *vidutinis_g* – vidutinis taškų debesies aukštis virš jūros lygio; *std* – taškų debesies aukščio standartinis nuokrypis. Šie parametrai buvo apskaičiuoti naudojant abu lazerinius taškinius debesis (1500 m ir 400 m skrydžio aukščiai) taikytus tyrime. Žemės paviršiaus aptikimo lazerinių matavimų tikslumas bei įtaką jam skenuojant taškų debesis ir miško savybes buvo analizuojami dviem būdais: a) skirtumas tarp aukščių – standartinis (išvestinis geodezinių matavimų pagrindas) ir b) numatomą variantą (gautą iš lazerinio skenavimo taškų debesies) bei analizuoti sklypo lygyje. Nustatytos aukščių kvadratinės paklaidos buvo gana sistemingos ir reikšmingos pačiam tyrimui. Miško sąlygų įtaka

lazerinio skenavimo taškų tankiui buvo įvertinta sugrupuojant analizuojamus sklypus pagal bet koki simbolį ir lyginant suformuotas imtis naudojant Stjudento testą tarpusavyje. Skirtingų miško savybių įtaka žemės savybėms ir paviršiaus aukščiai buvo analizuojami atliekant perteklinę analizę.

Antra, atskiro medžio dendrometrinių charakteristikų įvertinimas. Matavimams panaudoti visų Dubravos girioje išmatuotų medžių duomenys: išmatuotas medžių dendrometrinės charakteristikos buvo palygintos su atitinkamomis prognozuotomis dendrometrines charakteristikomis pagal LiDAR duomenis ir kitus parametrus apskaičiuojamus pagal lazerinio skenavimo duomenis. Lazerinio skenavimo taškų debesis buvo papildomai apdorotas „*TerraScan*“ programine įranga, pašalinant iš jo taškus, sudarančius žemės paviršių, ir nukreipiant aukščiau esantį aukštį, kurio atstumas nuo žemės paviršiaus buvo didesnis nei 50 m. Debesų taškai, kurių aukštis virš žemės paviršiaus buvo didesnis nei 1 m, buvo priskirti augalijos klasei. Medžių lajų projekcijos buvo pažymėtos sukuriant 1 m „medžių zoną“ spinduliu (su 0,1 m nuokrypa), t.y. buferinė zona buvo sukurta naudojant ArcGIS programinę įrangą. Taip pat atlikta ir erdvinė medžių zonos ir lazerinio skenavimo taškų debesis perdanga bei pasirinkti tik į šią zoną patenkantys taškai. Kiekvienas debesis taškas buvo pažymėtas atitinkamu medžio numeriu. „Medžių zonoje“ buvo 138274 taškų, gautų skenuojant iš 1500 m aukščio, ir gauta 267015 taškų skenuojant iš 400 m aukščio. Šiuos taškus atitinkamai sudarė 13059 ir 6023 medžiai. Remiantis lazerinio skenavimo taškų debesis duomenimis, toliau kiekvienam medžiui nustatyti parametrai: $dz_vidurkis$ – aritmetinis aukščio vidurkis virš žemės paviršiaus lazerinio skenavimo taškų, klasifikuojamų kaip augmenija; dz_sd – lazerinio skenavimo standartinis aukščio virš žemės paviršiaus nuokrypis taškai, klasifikuojami kaip augmenija; dz_min , dz_max – minimalus ir maksimalus augmenijai priskirtų lazerinio skenavimo taškų aukščio virš žemės vertės; $H90$ – aukštis virš žemės paviršiaus, iš kurio grįžta 90% visų atspindžių (90 procentilis). Analizuojama cilindrinė erdvė aplink medžio centrą, kur cilindro spindulys – 1 m, o aukštis lygus dz_max aukščiui. Panašiai apskaičiuojami 80, 70, 60, 50, 40, 30, 20 ir 10 procentų procentiliai. 8 ($H80$, $H70$ ir kt.), $DS1$ – atspindžių procentas, gautas iš mažesnio nei 10 proc. visų atspindžių aukščio reikšmių (vertikalaus tankio santykis) – tai ta pati erdvė kaip ir viduje analizuojamas procentilių atvejis. Analogiškai buvo skaičiuojami $DS2$, $DS3$, ..., $DS9$, t.y. atitinkantys 0,2 dz_max , 0,3 dz_max , ..., 0,9 dz_max ir t.t.

Juodkienė V. 2018. Hiperspektrinio skenavimo galimybės medžių charakteristikoms įvertinti. Akademija. /Daktaro disertacija/

Nuotolinių stebėjimų taikymo miškotyroje tikslas visada buvo greičiau ir pigiau nei antžeminiai metodai rinkti duomenis ir nustatyti tai, kas nematoma plika akimi. Norint detalai įvertinti dominančių objektų savybes, pastaraisiais dešimtmečiais atsirado nauja nuotolinio stebėjimo šaka – hiperspektrinis skenavimas. Spartus hiperspektrinių jutiklių vystymasis ir specializuotų algoritmų, skirtų hiperspektriniam vaizdui kurti, atsiradimas yra laikomi vienu svarbiausių proveržių nuotolinių stebėjimų srityje. Šiame darbe pristatomas tyrimas, naudojant ant rėmo montuojamą hiperspektrinių jutiklių sistemą, sumontuotą ant ultralengvojo lėktuvo – vieno pirmųjų tokio pobūdžio Lietuvoje. Šio darbo tikslas – įvertinti galimybę panaudoti hiperspektrinius skenavimus skirtingų medžių savybėms nustatyti ir pasiūlyti būdus, kaip šią techniką pritaikyti praktikoje. Šiame darbe pirmą kartą analizuojama pirminio ir fotogrametrinio kadro tipo hiperspektrinio vaizdo apdorojimo ir informacijos išgavimo problema, o siūlomas sprendimas yra pakankamai originalus panašių tyrimų kontekste. Tyrimo rezultatai rodo, kad naudojant iš ultralengvųjų orlaivių gautų hiperspektrinių antenų kadų tipus galima generuoti ortonuotraukas, atitinkančias Lietuvos miškų inventorizacijose naudojamų ortonuotraukų ir jų geometrinio tikslumo reikalavimus. Straipsnyje toliau plėtojamas hiperspektrinio skenavimo taikymas paprastosios pušies genetinei kilmei, perkeliant jį iš laboratorijos į visą nuotolinio stebėjimo projektų apimtį. Nustatyta, kad paprastosios pušies populiacijos patikimai skiriasi nuo sėklų profilių duomenų (85,2%). Toliausias populiacijos, kuriose Ispanija ir Suomija yra geografiškai atskirtos, yra geriausios. Kietmedžio rūšių išskyrimas pasiteisino gana sėkmingai ir jį sunku naudoti su kitais nuotolinio stebėjimo sprendimais. Šiame darbe pateikiamos rekomendacijos, kaip tobulinti žalinimo inventorių ir jų stebėjimą arba naudojant aerzolinį hiperspektrinį vaizdą, siekiant nustatyti miško medžių genetinę kilmę.

Kauno miškų ir aplinkos inžinerijos kolegija. 2017. Miškininkystė ir kraštotvarka. Kaunas.

LiDAR renkami duomenys yra ne tik informacija apie geodezinį Žemės paviršiaus aukštį, bet ir apie gamtos bei žmogaus sukurtus objektus. Tačiau ne visi matavimo metodai ir sistemos yra be klaidų. Daugelis mokslininkų ištyrė šio metodo tikslumą, o H. Zachary savo straipsnyje teigė, kad LiDAR duomenų tikslumas svyruoja nuo 1 m iki 2 m, o vidutinė kvadratinė paklaida – nuo 15 cm iki 20 cm. Anot A. Žalnieriuko, LiDAR lazerio spindulys atstumą iki kietų paviršių matuoja 1-3 cm tikslumu, o tikrasis skenavimo aukštis miestuose siekia apie 10-15 cm. B. Ruzgienė atkreipė dėmesį, kad matavimo tikslumas daugiausia priklauso nuo skrydžio aukščio. Anot jos, LiDAR duomenų tikslumas

siekia apie 15 centimetrų. K. Kraus pateikė vieno iš savo tyrimų rezultatus, rodančius vertikalų tikslumą 0,50 m miškuose ir 10-15 cm gatvėse. Anot A. Žalnieriuo, padėties nustatymo skenavimo tikslumas priklauso ne tik nuo skrydžio aukščio, bet ir nuo skenavimo prietaiso savybių, skenuojamos atkarpos pločio, GPS ir skenavimo prietaiso padėties orientacijos paklaidos, lazerio dažnio ir sklaidos, atmosferos sąlygų, ypač atspindžių paviršiaus savybės ir kiti veiksniai. Apdorojant duomenis buvo pašalinti atspindžiai su silpnais signalais, susilpninti tankios augmenijos. Todėl taškų aprėptis ne visoje Lietuvoje gali būti vienoda. Darbe pabrėžiama duomenų patikimumo analizės svarba, o geodezija čia ir naudojama tikslumui patikrinti, nes tai tiksliausias būdas nustatyti objekto ar teritorijos padėties erdvėje koordinates.

Rupšys P., Petrauskas E. 2017. A Linkage among Tree Diameter, Height, Crown Base Height, and Crown Width 4-Variate Distribution and Their Growth Models: A 4-Variate Diffusion Process Approach. Kaunas.

Vienas iš Lietuvos (VDU) mokslininkų tarptautinių darbų, kuriame pateikiama miškų ir miškotyros analizė matematinėje perspektyvoje. Darbe akcentuojama matematinė duomenų surinkimo, apdorojimo ir analizės bei panaudojimo išraiška, kuri paremta įvairiomis analitinėmis lygtimis ir algoritmais. Ši perspektyva išryškina keturių kintamųjų medynų ir pavienių medžių skersmens pasiskirstymo tikimybės raidai medžių lajos aukštyje. Bendras aukštis, lajos pagrindo aukštis ir lajos plotis atsižvelgiant į amžių miško medynuose kelia didelį susidomėjimą miškų tvarkymui ir miško išteklių vertinimui. Šiame straipsnyje pagrindinis dėmesys skiriamas 4 tipo fiksuoto efekto stochastinei diferencialinei lygčiai (SDE), skirtai kiekybiškai įvertinti medžio dydžio dinamiką komponentų pasiskirstymo pagal amžių atžvilgiu. Naujoji išvestinė - 4 kintamųjų tikimybės tankio funkcija ir taikomi jai ribiniai vienmačiai, dvimačiai, trimačiai ir sąlyginiai kintamieji, siekiant įvertinti miško skirstinių medyno požymius, tokius kaip vidutinis skersmuo, aukštis, lajos pagrindo aukštis, lajos plotis, jų modelis ir apimtis. Visi parametrai buvo įvertinti remiantis didžiausios tikimybės procedūra, naudojant 1630 paprastųjų pušų (12 medynų) duomenų rinkinį. Rezultatai buvo patvirtinti naudojant 699 duomenų rinkinį taip pat paprastųjų pušų (penki medynai). Įtraukta ir naujai sukurta 4 variantų vienalaikė SDE sistema, paremta kovariacijos struktūra, kuri lemia medžio dydžio komponentų pokyčius ir patobulintas prognozes vieno medžio dydžio komponentams, atsižvelgiant ir į kitus sistemos medžio dydžio komponentus.

Mozgeris G., Juodkienė V., Jonikavičius D., Straigyte L., Gadal S., Ouerghemmi W. 2018. Ultra-Light Aircraft-Based Hyperspectral and Colour-Infrared Imaging to Identify Deciduous Tree Species in an Urban Environment. Kaunas.

Nuotolinių tyrimų taikymą galima laikyti kompromisu tarp vaizdo gavimo platformų, jutiklių ir duomenų rinkimo bei apdorojimo metodų. Šiame tyrime nagrinėjamas hiperspektrinių vaizdų potencialas, naudojant itin lengvus orlaivius augmenijos rūšių aplinkos mieste kartografavimui, tiriant inžinerinius ir mokslinius šios srities aspektus, susijusius su atvaizdavimo platforma ir vaizdų klasifikavimo metodais. Vaizdo gavimo sistema, pagrįsta kadro formato hiperspektrinės ir „Nikon D800E“ pritaikytos spalvotos infraraudonųjų spindulių kameros naudojimu, įrengtos ant pilotuojamo ultralengvojo lėktuvo „Bekas X32“. Buvo atliktos dvi bandomosios vaizdo surinkimo skrydžio misijos 2015 m. liepos mėn. ir 2016 m. rugsėjo mėn. daugiau nei 4000 ha plote Kauno mieste, Lietuvoje. 2015 ir 2016 metais buvo užfiksuotos 64 spektrinės juostos 500–900 nm spektro diapazone, su spalvotais infraraudonųjų spindulių atvaizdais. Vertinant identifikaciją, buvo išnagrinėti trys tyrimo klausimai, aktualūs šešioms lapuočių medžių rūšims: a) išankstinis spektrinių savybių apdorojimas klasifikavimui, b) penkių įprastų mašininio mokymosi (angl. *machine learning*) klasifikatorių išbandymas ir c) hiperspektrinio ir spalvoto infraraudonųjų spindulių vaizdų suliejimas. Klasifikavimo veiksmingumas buvo įvertintas taikant kryžminį atleidimo-vieno patvirtinimo metodą atskiro lajos lygiu ir kaip atskaitą naudojant ne mažiau kaip 100 lauke inventorizuojamų medžių kiekvienai rūšiai. Geriausiai veikiantis klasifikavimo algoritmas – daugiasluoksnis perceptronas, naudojant visą savybių spektrą, gautų iš hiperspektrinių vaizdų, lėmė vidutinį klasifikavimo tikslumą. Bendras klasifikavimo tikslumas buvo 63%, Cohen'o Kappa reikšmė buvo 0,54, o rūšiai būdingas klasifikavimo tikslumas siekė 51–72 proc. Hiperspektriniai vaizdai lėmė reikšmingą rezultatą geresniam modelio medžių rūšių klasifikavimo gebėjimui nei spalvoti infraraudonųjų spindulių vaizdai ir tuo pačiu metu naudotos spektrinės savybės, gautos iš hiperspektrinių ir spalvotų infraraudonųjų spindulių vaizdų, šiek tiek pagerino tikslumas, palyginti su 2015 m. Nors klasifikacijose naudojami 64 juostų hiperspektriniai duomenų kubai lėmė santykinai didesnę tikslumą nei 16 juostų, klasifikavimo klaidų matricos nebuvo statistiškai skirtingos. Alternatyvios vaizdo gavimo platformos (pvz., nepilotuojamas orlaivis ir „Cessna 172“ orlaiviai) ir skrydžių nustatymai buvo aptarti naudojant imituojamus vaizdo gavimo projektus, darant prielaidą, kad tai yra ta pati studijų ir taikymo sritis. Itin lengvas orlaivis sukurtas hiperspektriniam ir spalvotam infraraudonųjų spindulių vaizdavimui buvo laikomas techniškai ir ekonomiškai pagrįstu miesto žaliosios erdvės sprendimų inventorizavimui, palengvinantys medžių kartografavimą, apibūdinimą ir stebėjimą.

1.4. Ankstesnių tyrimų apžvalga užsienyje

Leeuwen M., Nieuwenhuis M. 2010. Retrieval of forest structural parameters using LiDAR remote sensing. New York.

Šiame darbe pateikiama literatūros apžvalga apie lazerinių nuotolinių sistemų metodų naudojimą miško inventorizacijos parametrų ir struktūrinių charakteristikų paieškai. Esami metodai yra išdėstyti atsižvelgiant į jų taikymo mastus (t. y. kosmoso, oro ir antžeminės lazerinės sistemos) ir pateikiama diskusija efektyvumo, tikslumo ir struktūrinių parametrų gavimo atitinkamomis skalėmis, įgyvendinimo galimybės. Straipsnyje išsamiau aptariama LiDAR (šviesos aptikimo ir diapazono) sistema, gaunamų duomenų potenciali galimybė būti sujungtiems su kitų tipų nuotolinio stebėjimo duomenimis ir užbaigiama rekomendacijomis dėl būsimų tyrimų ir galimybių taikyti LiDAR miškų apibūdinimui. Galima LiDAR nuotolinio stebėjimo vertė miškų stebėjimo ateičiai yra akivaizdi, atsižvelgiant į LiDAR pajėgumus atlikti objektyvius 3D miško struktūros vertinimus. Ilgai diskutuota problema, susijusi su miškų monitoringu ir inventorizavimu yra tokių vertinimų subjektyvumas. Netgi nors ir buvo stengiamasi apibrėžti ir nurodyti biologinės įvairovės rodiklius, kad miškų inventorizacijos būtų daugiau tikslingos ir būtų galima palyginti miškų medynus, atsižvelgiant į jų ekologinę vertę, subjektyvumas vis dar išlieka neapibrėžtumo šaltiniu daugeliui miškų valdytojų ir planuotojų, ypač kai tai yra susiję su valdymo ir planavimo sprendimais dideliems miškų plotams, pvz. planuojant nacionalines ar regionines užduotis šalies valdžios arba savivaldos lygmenyje. Kadangi daugelis šių biologinės įvairovės rodiklių yra susiję su struktūra, LiDAR technologija turi potencialą patenkinti objektyvumo ir atkuriamumo matavimų poreikį. Galimas LiDAR nuotolinių tyrimų metodo panaudojimas buvo įrodytas jau keliuose iš nurodytų tyrimų šiame darbe, kuriame pateikiamos įvairios struktūrinės miško charakteristikos buvo „ištrauktos“ tik iš LiDAR duomenų. Šiuose tyrimuose, daugiausia dėmesio buvo skiriama medžių aukščio įverčių išvedimui. Oro ir kosmoso LiDAR sistemų duomenų naudojimas yra dar vienas pavyzdys medžių lajos aukščio ir profilio išvedimui. Tai parodo šios naujos technologijos panaudojimo galimybes miškotyroje ir miškų pajėgumų gerinimui darbuotojams rinkant duomenis, kurie padėtų valdyti miškus ir priimti tinkamus sprendimus.

Arvidsson S., Gullstrand M. 2019. Classifying natural forests using LiDAR data. Jönköping.

Miškų ūkyje natūralūs miškai yra didelės ir diversifikuotos biologinės įvairovės miško plotai, kuriuos reikia išsaugoti. Dabartinis natūralių miškų kartografavimas yra varginantis darbas, reikalaujantis didelio kiekio rankinio darbo ir galbūt galėtų būti automatizuotas. Šiame darbe nagrinėjamos

pagrindines ypatybes, kurias klasifikuojant naudojamas atsitiktinis natūralaus miško algoritmas ir analizuojamas miško masyvas Šiaurės Švedijoje. Tikslas buvo sukurti mašininio mokymo (angl. *Machine Learning*) modelį su didele susitarimo verte, t. y. (angl. *Kappa value*) yra 0,61 arba didesnė, tuomet modelis įtraukiamas į tą patį diapazoną kaip ir ankstesnių tyrimų metu pagaminti modeliai. Panaudoti rastriniai duomenys, surinkti ir agreguoti iš ore skraidančios LiDAR sistemos, kartu su pažymėtu pavyzdžiu plotų, kuriuos tiekia Švedijos miškų agentūra. Buvo atlikti du eksperimentai su skirtingomis savybėmis. Pirmajame eksperimente buvo naudojamos savybės, gautos naudojant metodus iš ankstesnių tyrimų, o antrasis eksperimentas papildė šias funkcijas. Nuo bendro naudoto mėginių plotų skaičiaus ($n=2882$), modeliams apmokyti panaudota 70 proc., o 30 proc. buvo naudojami jo vertinimui. Rezultatas buvo *Kappa* vertė 0,26 pirmojo eksperimento metu ir 0,32 antrojo eksperimento metu. Geriausiai matomos ir išreikštos miško masyvo savybės gautos iš medžių lajos aukščio, kuriai pateikti duomenys taip pat turėjo ir didžiausią skiriamąją gebą. Buvo įrodyta, kad lajos plotai, gauti iš jos aukščio, yra svarbiausias miško plotą klasifikuojantis komponentas. Tyrimo rezultatai tyrimo tikslo ir uždavinių iki galo neįgyvendino - tai parodė daugybę tyrimo tikslui panaudotų duomenų trūkumą. Tikėtina, kad imties sričių dydis ir rastrinių duomenų skiriamoji geba yra itin svarbūs veiksniai išskiriant svarbiausias savybes ir vaidina didelį vaidmenį sukurti mašininio mokymo modelio veikime.

Kumar J., Weiner J., Hargrove W. W., Norman P. S., Hoffman M. F., Newcomb D. 2020. Characterization and classification of vegetation canopy structure and distribution within the Great Smoky Mountains National Park using LiDAR. Oak Ridge.

Medžių lajos struktūra, tankis ir dydis yra labai svarbios buveinių, būdingų daugeliui nykstančių ir paukščių ir kitų rūšių gyvūnų, charakteristikoms, ir tai yra pagrindinė reikalinga informacija miškų ir laukinės gamtos valdytojų stebėsenai ir miškų išteklių tvarkymui, išsaugojimo planavimo ir biologinės įvairovės puoselėjimo tikslų įgyvendinimui. Šviesos aptikimo ir nuotolio nustatymo (LiDAR) technologijų pažanga įgalino nuotoliniu būdu pagrįstus medžių lajos tyrimus fiksuojant trimates struktūras, suteikiant informaciją, kuri nėra pateikiamuose dvimačiuose kraštovaizdžio vaizduose tradicinėmis daugiaspektrinėmis nuotolinio stebėjimo platformomis. Tačiau didelės apimties duomenų rinkiniai, kuriuos sukuria ore skraidantys LiDAR instrumentai kelia didelį skaičiavimo iššūkį, reikalaujantį algoritmų, skirtų nustatyti ir analizuoti palaidotus interesų modelius LiDAR taškiniuose debesyse efektyviu skaičiavimo būdu, naudojant naujausią skaičiavimo infrastruktūrą. Čia sukūrtas ir taikytas skaičiavimo požiūriu veiksmingas metodas analizuoti dideles LiDAR duomenų apimtis ir apibūdinti augmeniją 139 859 hektarų medžių lajos konstrukcijų „Great Smoky Mountains“

nacionaliniame parke. Šis tyrimas padeda tobulinti mūsų supratimą apie augmenijos ir gyvūnų buveinių pasiskirstymą šioje nepaprastai įvairioje pasaulinėje ekosistemoje.

Lim K., Treitz P., Wulder M., St-Onge B. 2003. LiDAR remote sensing of forest structure. Los Angeles.

Šviesos aptikimo ir nuotolio nustatymo (LiDAR) technologija gali teikti horizontalią ir vertikalią informaciją su didele erdvine raiška ir itin dideliu vertikalium tikslumu. Miško savybes arba atributus, tokius kaip miško medžių lajos aukštis, galima tiesiogiai gauti iš LiDAR duomenų. Tiesioginis lajos aukščio „paėmimas“ suteikia galimybės modeliuoti antžeminę biomasę ir pačios lajos tūrį. Prieiga prie vertikalios perspektyvos gamtos miškų ekosistemų gerinimo, taip pat suteikia naujų galimybių stiprinant miškų stebėseną, tvarkymą ir planavimą. Lazerinė altimetrija arba šviesos aptikimas ir nuotolis (LiDAR) yra aktyvus nuotolinis stebėjimas technologija, kuri nustato diapazonus (t. y. atstumus), paimdama greičio sandaugą tarp šviesos ir laiko, reikalingą skleidžiamam lazeriui nukeliauti iki tikslinio objekto. Praėjęs laikas nuo tada, kai lazeris skleidžiamas iš jutiklio ir atsimuša arba yra sulaikomas objekto, gali būti matuojamas naudojant bet kurį impulsinį diapazoną, kur lazerio impulso kelionės laikas nuo objekto: a) užfiksuojamas jutiklio į tikslinį objektą; arba b) nuolatinės bangos (agl. *continuous wave (CW)*) diapazonas, kai fazės pokytis perduodamame sinusoidiniame signale, kurį sukuria nuolat sklindanti lazerio šviesa yra paverčiamas kelionės laiku. Šiuo metu dauguma naudojamų LiDAR sistemų yra pagrįstos impulsų diapazono principu ir, pasak mokslininkų A. Wehr ir U. Lohr, 1999 m. teigusių, kad yra tik vienas komercinis „CW“ orlaivinis lazerinis skaitytuvas. Vadinasi, „CW“ lazeriai nebuvo naudojami LiDAR programose miškotyroje, todėl svarbu pažymėti, kad visos tolesnės nuorodos į LiDAR sistemas netiesiogiai nurodo impulsų diapazono lazerio sistemas.

Hudak T. A., Evans S. J., Smith S. M. A. 2009. LiDAR Utility for Natural Resource Managers. Lewiston.

LiDAR nuotolinio aptikimo sistemų populiarumui sparčiai augant, vis dažniau gamtos išteklių valdytojai pripažįsta didžiulį LiDAR gautos informacijos naudingumą priimant geresnius sprendimus. Tyrimo apžvalgoje pateikiamas daugelio neseniai atliktų tyrimų, įrodančių jų svarbą, pjūvis LiDAR sistemų atžvilgiu, visoje sausumos gamtos išteklių disciplinų rinkinyje, įskaitant miškotyra, gaisrus, kurą, ekologiją, laukinę gamtą, geologiją, geomorfologiją ir paviršiaus hidrologiją. Tai numatoma domėjimusi ir pasitikėjimu LiDAR technologija būtent gamtos išteklių valdymo srityje tiek atskirai, tiek viduje LiDAR duomenis panaudojant su kitų nuotolinių stebėjimų duomenimis, ir kad tai toliau sparčiai plėsis ateityje. Šviesos aptikimas ir diapazonas (LiDAR) vis labiau atkreipia dėmesį į gamtos

išteklų tvarkytojus ir valdytojus. LiDAR duomenys suteikia reikiamą skiriamąją gebą ir detales apie miškus, ganyklas, vandens baseinus, kelius ir kitus vertingus išteklius, padedančius informuoti ir tobulinti turto bei išteklių valdymo sprendimus. Su LiDAR sistema susijusios žemės ir augmenijos atributų charakteristikos yra nuoseklios ir išryškinančios plataus masto pritaikymo galimybes. Daugybė tyrimų per pastaruosius dvidešimt metų, iš kurių daugelis cituoti tyrime, prisidėjo prie susidomėjimo, kuris dabar dar labiau plečiasi net už mokslo bendruomenės ribų. Tyrimo tikslas yra suteikti miško valdytojams ir miškų mokslų tyrėjams geresnį supratimą apie tai, kokios naudos jie gali gauti naudojant LiDAR ir kodėl LiDAR gali žymiai pagerinti kitus nuotolinių stebėjimų metodų duomenis, kuriuos jie yra naudoję praeityje.

Weiskittel R. A., Ayrey E. 2015. LiDAR and Forestry: Opportunities, Challenges, and Future Directions. Maine.

Miško inventorizacijos atributikos generavimas iš LiDAR taškų debesies yra kelių etapų procesas. Pirma, turi būti atlikta miško ploto inventorizacija, jo įsigijimo laiko atžvilgiu, ir įtraukta išsami informacija pageidaujamiems miško atributų matavimams. Norint tai padaryti, atitinkami sklypai turi turėti fiksuoto spindulio, kuris yra reprezentatyvus kiekvienam miškui pagal nustatomo medyno tipą, teritoriją. Nepaisant naudojamo sklypo tipo, vienas iš svarbiausių veiksnių darančių įtaką santykiui tarp žemės ir LiDAR duomenų yra geografinis sklypo centro tikslumas. Remiantis paskutiniaisiais tyrimais Meino universitete, skaičius reikalingas individualiam sklypui gali skirtis priklausomai nuo miško tipo ir jame vyraujančios biologinės įvairovės, atrankos metodo ir pageidaujamo tikslumo. Taip pat, dažnai stratifikacija yra naudinga, kai LiDAR duomenys yra surinkti dideliame plote. Siekiant susieti LiDAR duomenis su miško inventorizacijos duomenimis, kiekvieno sklypo metrikų skaičius apskaičiuotas iš trimačio (3D) taškų debesies. Ši metrika ir skaičiavimai apima įvairią medžių lajos tankio ir aukščio informaciją. LiDAR impulsų aukščiai yra efektyviausi prognozių šaltiniai, nes jie atspindi pagrindines medžių lajos struktūros charakteristikas. Įvairių tipų ir struktūros miškuose Meino ir Naujajame Bransvike 45 ir 85 procentilių derinys LiDAR taškinių debesų aukščio buvo daugiausiai veiksmingas stebimo sklypo biomasės prognozei. Veiksmingiausios prognozės yra determinuotos: parametrinės (pvz., regresija) arba neparimetrinės (pvz., atsitiktinių miškų), tarp kurių empiriniams santykiams kurti būtent ir naudojami metodai tarp LiDAR metrikos ir žemės sklypo duomenų. Priklausomai nuo inventoriaus kintamųjų, LiDAR duomenų kokybės, ir antžeminių duomenų diapazono, šiuos ryšius dažnai paaiškina 60-90% pastebėtų variacijų su paprastai mažesniu stiebo tankio tikslumu ir didesniu tūrio arba biomasės tikslumu.

2. TYRIMO METODIKA

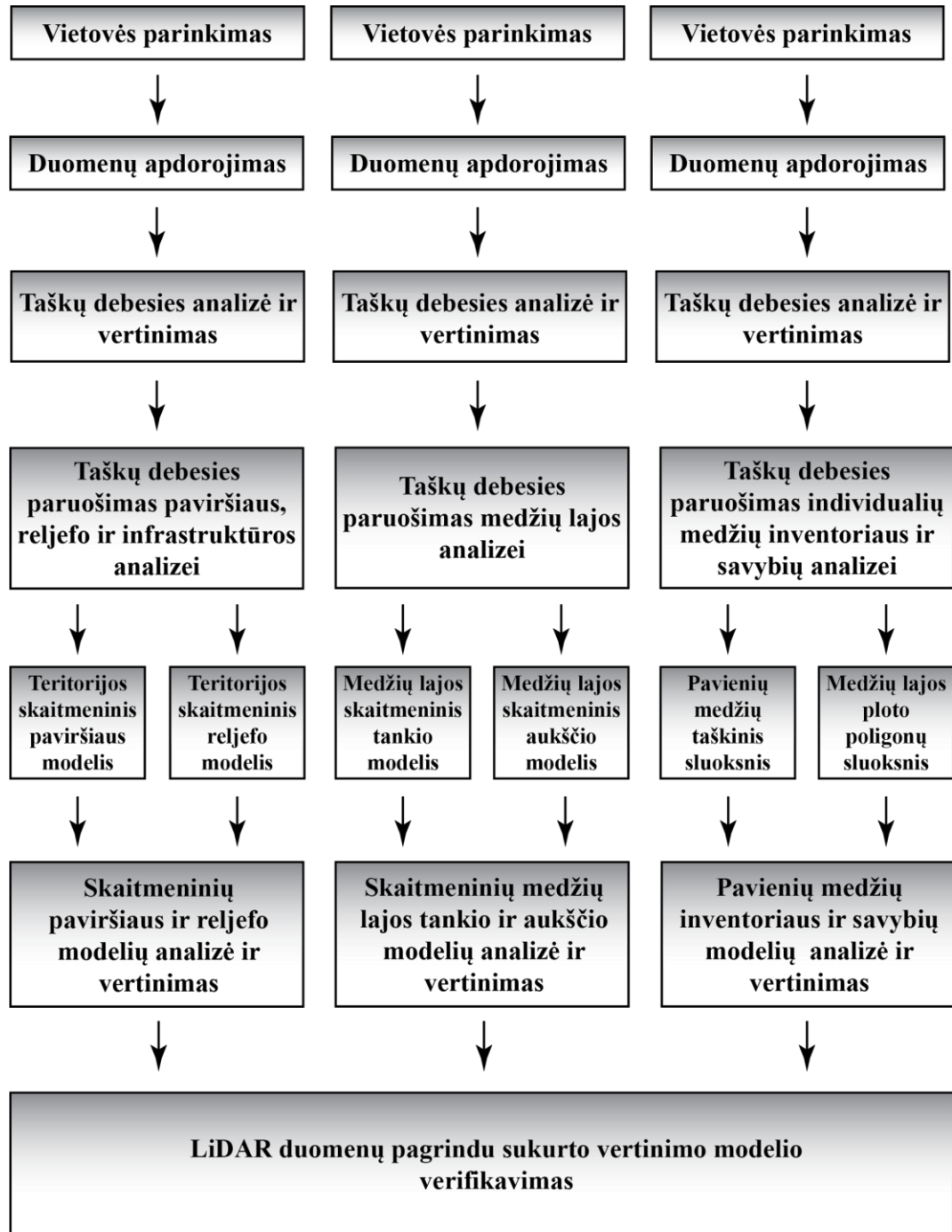
2.1. Duomenys, techninė ir programinė įranga

Pagrindinis ir svarbiausias duomenų rinkinys, kuris buvo pasitelktas siekiant įgyvendinti tyrimo uždavinius yra „LiDAR_DR_LT“ – vadinami skaitmeniniai erdviniai lazerinio skenavimo taškų 2019-2021 m. duomenys. Tai – iki 2023 metų visoje Lietuvos Respublikoje surinkti (projektas šiai dienai vis dar vykdomas) skaitmeninės erdvės paviršiaus lazerinio skenavimo taškų (LiDAR sistemos) duomenys. Šio duomenų rinkinio LiDAR taškų debesies tankis bet kurioje pasirinktoje teritorijoje yra ne mažesnis kaip 6,5 taško kvadratiname metre. Vidutinė kvadratinė taško RMSE horizontalaus nustatymo paklaida, matavimus atliekant ant tvirtų, nekintančių objektų neviršija 30 cm, o vertikalių matavimų paklaida - neviršija 10 cm. Pateikiamame duomenų rinkinyje, kaip įprasta, LiDAR duomenys yra klasifikuojami pagal LAS specifikaciją į 8 klases: **0 ir (arba) 1 klasė** – neklasifikuoti taškai (angl. Created, never classified; Unclassified); **2 klasė** – žemės paviršiaus taškai (angl. Ground); **3 klasė** – žema augmenija (angl. Low Vegetation); **4 klasė** – vidutinė augalija (angl. Medium Vegetation); **5 klasė** – aukšta augmenija (angl. High Vegetation); **6 klasė** – pastatų taškai (angl. Building); **7 klasė** – triukšmo taškai (angl. Low Points/Noise) ir **12 klasė** – persidengimo taškai (angl. Overlap Points). Duomenys pateikiami M 1:2000 mastelio lapais, suskirstytais pagal LKS-94 koordinacių sistemą „laz“ formatu. Duomenų rinkinys prieinamas M 1:10000 mastelio nomenklatūrinių lapų aprėpties „zip“ bylose. Pavienės bylos atitinka tam tikras nedideles teritorijas, kurios yra aktualios tyrimui. Tokio tipo duomenų pateikimas yra gerokai efektyvesnis, kadangi duomenų atsisiuntimas ir užkrovimas vyksta gerokai greičiau ir efektyviau nei vartotojui pateikiant visas, pilnos aprėpties duomenų rinkinį iš karto. Šio erdvino duomenų rinkinio ir trimačio taškų debesies, sugeneruoto valstybiniu mastu visoje Lietuvoje, platintojas – VĮ „GIS-Centras“, o rengėjas – Nacionalinė žemės tarnyba prie Žemės ūkio ministerijos. Duomenys yra prieinami per interneto portalą „geoportal.lt“. Tai pats naujausias ir kol kas pažangiausias LiDAR duomenų rinkinys Lietuvos erdviųjų duomenų istorijoje, pasižymintis kiek didesniu tikslumu bei didesniu taškų tankiu į kv. km nei jo pirmtakai. (Geoportal, 2022) Be LiDAR lazerinio skenavimo duomenų rinkinio, gautų rezultatų skyriui ir modelio verifikavimui, bent jau iš dalies, panaudoti ir Valstybinės miškų tarnybos erdviniai miškų sklypų su atributais duomenys, miškų kadastro duomenys bei Valstybinių miškų urėdijos atviri duomenys, o likusi rezultatų verifikavimo dalis vykdoma remiantis ankstesnių, ypač užsienio, tyrimų rezultatais ir išvadomis. Apibendrinus ir susisteminus visus duomenų rinkinius, publikacijų rezultatus bei išvadas, sugeneruojamas tyrimo rezultatų ir modelio verifikavimui tinkamas informacijos srautas.

Kadangi LiDAR duomenys yra itin detalūs, jų apdorojimas reikalauja ganėtinai daug techninės įrangos resursų, todėl čia, kaip techninė įranga duomenų apdorojimui ir vizualizavimui buvo pasitelkti du nešiojamieji kompiuteriai: Dell G3 3500 (Intel Core i5-10300H CPU/8,00 GB RAM/NVIDIA GeForce GTX 1650 GPU) ir MSI GE66 Raider (Intel Core i7-11800H/32,0 GB RAM/NVIDIA GeForce RTX 3070 GPU), kurie puikiai susidorojo su jiems priskirtomis užduotimis. Bazinėms užduotims tokioms kaip teksto rašymas, duomenų rinkinio peržiūra ir pan. bei mažiau techninės įrangos resursų reikalaujantys analizės įrankiai buvo įgalintas pirmasis, o sudėtingesnei analizei ir didesniems duomenų rinkiniams pasitelktas antrasis kompiuteris. Kadangi kompiuteriai buvo naudojami du, pagal aprašytą tyrimo metodiką, vienu metu galima buvo įgalinti kelis įrankius su skirtingais parametrais, taip palengvinant optimaliausių kintamųjų paiešką. Kartu su technine įranga, tyrimui panaudotos ir programinės įrangos arba atskiri jų paketai bei įskiepai: ArcGIS Pro 2.9.0, RStudio 1.4.1717 (R 4.1.1), QGIS 3.22.4. ir CloudCompare 2.12. Nors tyrimo eigoje buvo panaudota bent keletas programinių įrangų arba atskirų jų paketų duomenims apdoroti, analizuoti ir vizualizuoti, kaip pagrindinė ir pamatinė programinė įranga tyrime naudota „*ESRI ArcGIS Pro*“ programinė įranga. Šios programinės įrangos geoerdvinių duomenų analizės (angl. *geoprocessing*) įrankiai buvo panaudoti kartu su jau apdorotais duomenimis, taip pat, galutinis duomenų apdorojimo ir analizės modelis bei jo verifikavimas buvo atliekamas taip pat šioje aplinkoje. Tyrime panaudoto R programavimo kalbos kodo redagavimui, rašymui ir tobulinimui naudota Rstudio, kuri yra viena iš populiariausių R programavimo kalbos „*IDE*“ aplinkų (angl. *Integrated Development Environment*). Be to, RStudio taip pat puikiai pasitarnavo norint greitai pasigilinti į patį duomenų rinkinį, jo metaduomenis, struktūrą, savybes bei pasigaminti paprastą, pirminę vizualizaciją bei iš duomenų rinkinio „ištraukti“ bazinę statistinę informaciją apie jį. Pirminiam duomenų rinkinio apdorojimui, konvertavimui į reikalingus formatus, peržiūrai, korekcijoms (jei tokių prireikė) buvo panaudota atviro kodo GIS programinė įranga QGIS. Čia buvo atliekamas pirminis duomenų įkėlimas į prie koordinacių sistemos pririštą aplinką, jų konvertavimas į parankesnius formatus bei pirminė analizė. Kadangi QGIS nėra toks jautrus trečiųjų šalių atviro kodo bibliotekoms ir įrankiams, kaip ArcGIS Pro - tai gana tinkamas įrankis tokiems darbams atlikti. Kartu su RStudio bei dvejais erdvinių duomenų analizės ir vizualizavimo įrankiais, tyrime panaudota ir CloudCompare programinė įranga. Kadangi CloudCompare pasižymi itin didelio greičio ir efektyviu trimačio duomenų rinkinio „perpiešimu“, jos paskirtis buvo taip pat greita duomenų rinkinio peržiūra, bazinė analizė ir korekcijos (jei tokių prireikė). Galutinis tyrimo modelis bei rezultatų generavimas buvo vykdomas vieningoje ArcGIS Pro aplinkoje, siekiant tyrimo vientisumo, tolygumo ir gerai tarpusavyje integruojamų rezultatų.

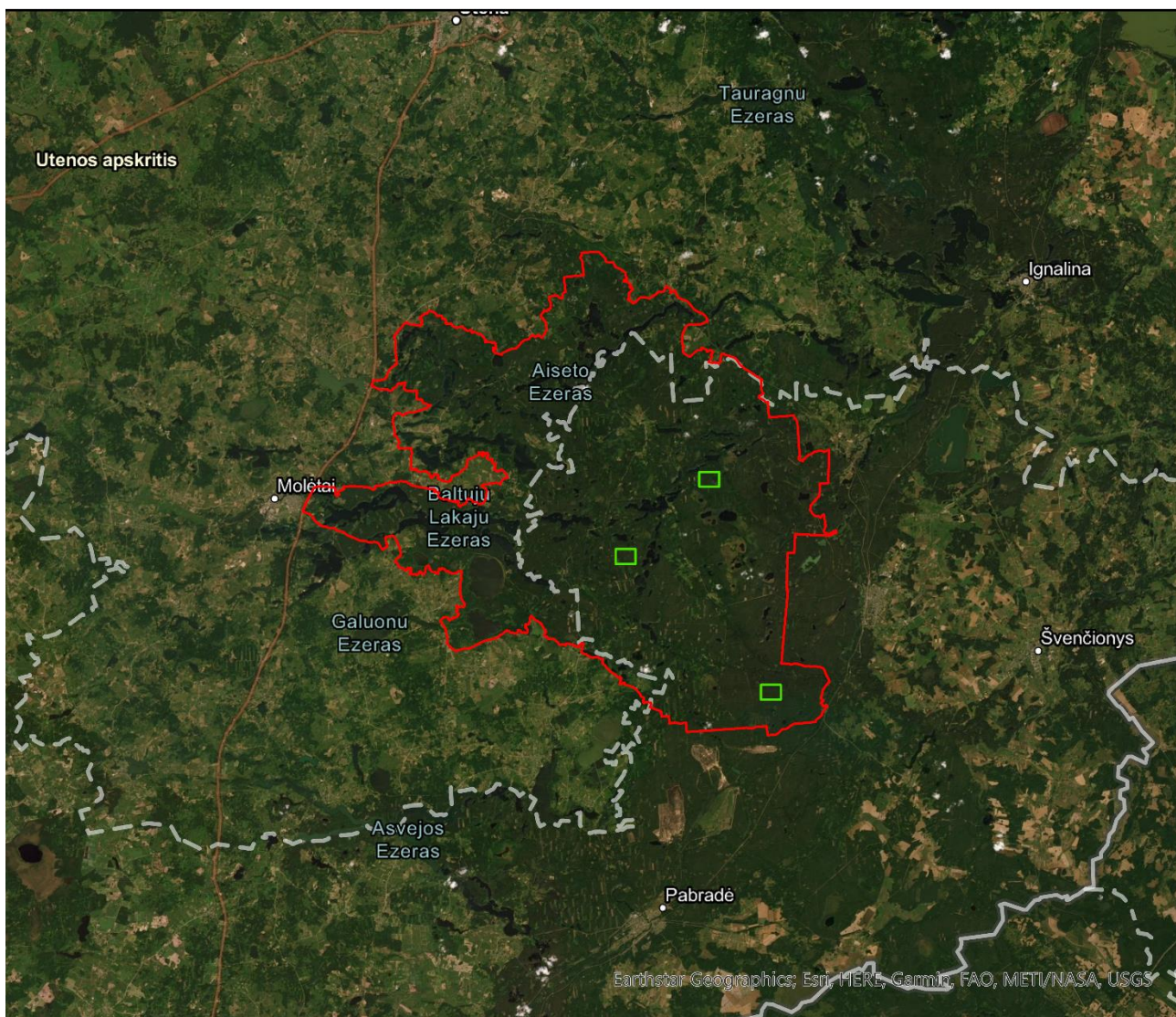
2.2. Duomenų taikymas miško būklės analizei ir vertinimui

Tyrimo metodologinė schema reprezentuoja apibendrintus žingsnius, kuriais vadovaujantis vykdoma tyrimo eiga:



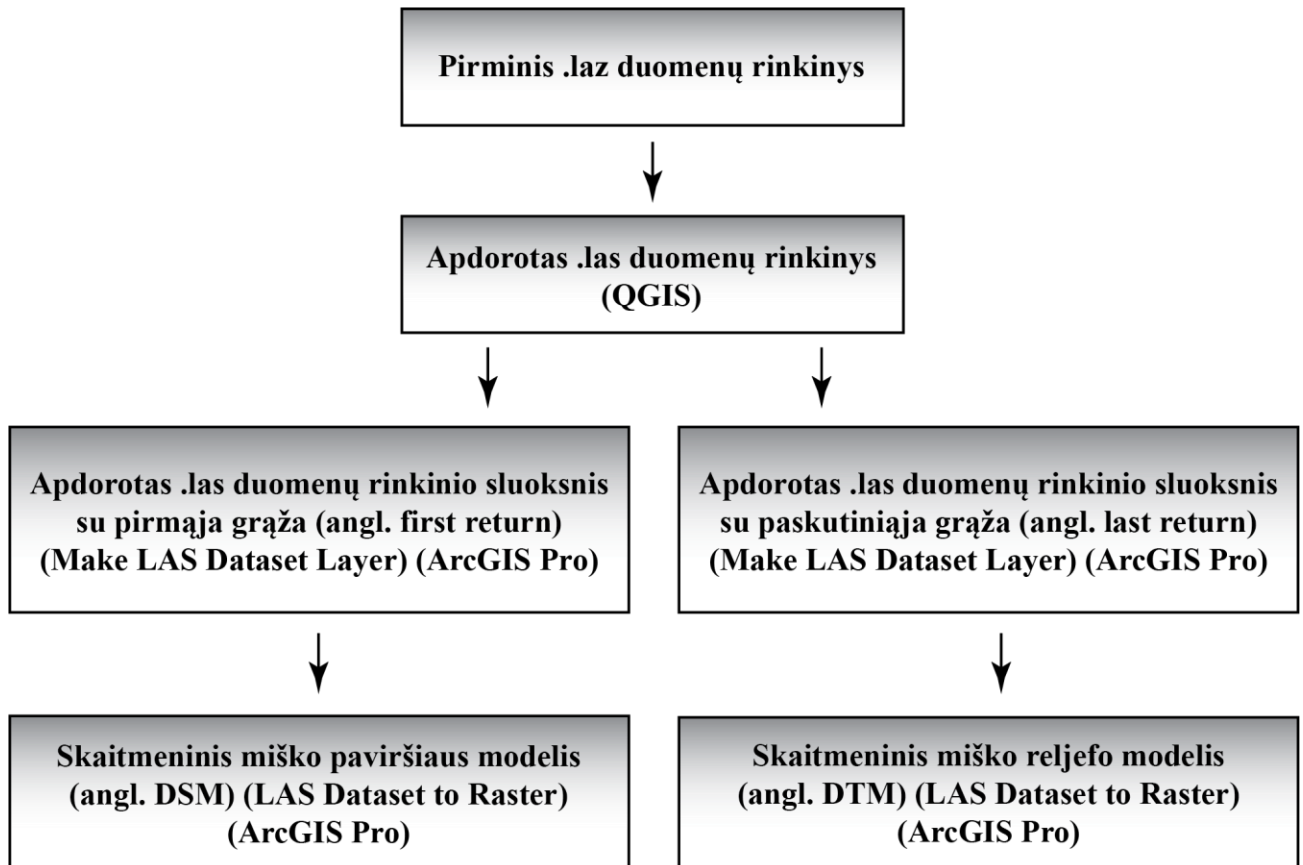
3 pav. Tyrimo metodologinė schema

Tyrimas pradamas nuo teritorijos parinkimo. Šiam darbui pasirinkta viena bendroji ir trys smulkesnės joje esančios teritorijos. Bendroji teritorija – Labanoro-Pabradės giria – antras pagal plotą Lietuvos miškų masyvas, esantis rytų Lietuvoje, Aukštaitijoje – Molėtų, Utenos, Švenčionių, Ignalinos ir Vilniaus rajonuose. Trys smulkesnės teritorijos parinktos atsitiktiniu būdu, su tikslu pritaikyti tyrimo metodiką skirtingiems teritoriniams vienetais ir verifikuoti tyrimo rezultatus palyginus juos tarpusavyje, taip pat su išoriniais šaltiniais.



4 pav. Bendroji ir smulkesnės tyrimo teritorijos – Labanoro-Pabradės giria

Duomenų apdorojimas vykdomas naudojant QGIS programinę įrangą dėl jos lankstumo operuoti trečiųjų šalių (angl. 3rd party) bibliotekomis ir įrankiais. Čia pritaikomas „LAStools“ įrankių rinkinys, kuris yra greičiausias ir atmintį efektyviai išnaudojantis sprendimas, skirtas paketinio scenarijaus kelių branduolių LiDAR apdorojimui ir gali paversti milijardus LiDAR taškų naudingais produktais dideliu greičiu ir mažais atminties reikalavimais.



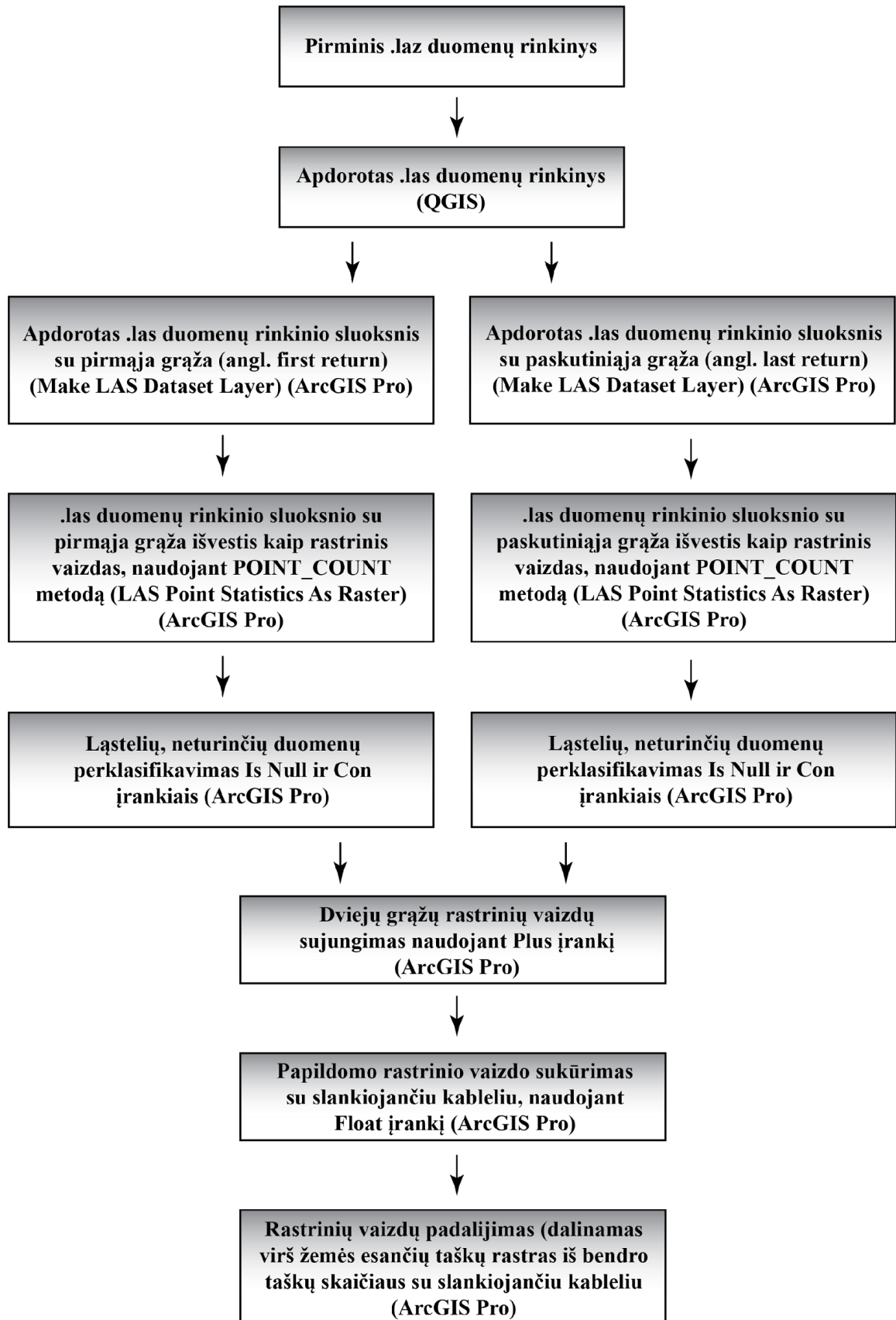
5 pav. Miško paviršiaus, reljefo ir infrastruktūros analizės schema

Siekiant išanalizuoti ir įvertinti pirmąją charakteristiką - miško paviršių, reljefą ir infrastruktūrą, pasitelkiamas apdorotas LAS duomenų rinkinys. Tokio formato rinkinys yra sugeneruojamas QGIS programinės įrangos pagalba iš pirminio LAZ rinkinio. Norint efektyviai dirbti ArcGIS Pro programinėje aplinkoje, reikalingas papildomas duomenų apdorojimo žingsnis – LAS duomenų rinkinio (sluoksnio) sukūrimas galutinėje aplinkoje, čia naudojamas „Make LAS Dataset Layer“. Ši funkcija leidžia prie sugeneruojant darbinį sluoksnį LiDAR duomenis filtruoti gražų, klasių ir kitų komponentų kontekste. Tokį veiksmą galima atlikti ir tame pačiame QGIS ar kitose programinėse įrangoje, tačiau dėl darbo tęstinumo, tai atliekama ArcGIS Pro. Funkcijos rezultatas – darbinis LiDAR taškų debesies sluoksnis. Sugeneruotas sluoksnis kiek palengvina darbą su sunkiais ir gausiai techninės įrangos resursų reikalaujančiais duomenimis. Kadangi turimas sluoksnis jau yra ArcGIS Pro programinės įrangos produktas, darbo procesas norint sugeneruoti skaitmeninius miško paviršiaus ir reljefo modelius yra gana tiesmukiškas – tereikalauja vieno įrankio ir vieno žingsnio. Tam pasitelkiamas „LAS Dataset to Raster“ įrankis, kuris pagal poreikį sugeneruotą LAS duomenų

rinkinį transformuoja į rastrinį vaizdą. Šio tyrimo atveju, norint įsigilinti į miško paviršių ir infrastruktūrą, reikalingas vienas LAS duomenų rinkinys su pirmąja grąža (angl. first return). Norint įvertinti miško reljefą, reikalingas kitas LAS duomenų rinkinys su paskutiniąja grąža (angl. last return). Skirtingiems LAS duomenų rinkiniams kiek skiriasi ir „LAS Dataset to Raster“ įrankio konfigūracija. Generuojant skaitmeninį reljefo modelį, pasirenkamas ląstelių priskyrimo tipas yra „AVERAGE“, tuo tarpu paviršiui ir infrastruktūrai – „MAXIMUM“. Abiems skaitmeniniams modeliams naudojamas „NATURAL_NEIGHBOR“ tuštumos užpildymo metodas. Generuojant skaitmeninį reljefo modelį, „AVERAGE“ ląstelių priskyrimo tipas labiau tinka paskutiniosios grąžos taškams, tuo tarpu „MAXIMUM“ geriausiai panaudojamas kuriant skaitmeninius paviršiaus modelius. Verta pabrėžti, kad svarbu nustatyti atitinkamą atitinkamą ląstelių dydį (angl. sampling value) naudojantis „LAS Dataset to Raster“ – jis turi būti bent keturis kartus didesnis už vidutinį atstumą tarp taškų. Ši informacija dažniausiai randama atitinkamo duomenų rinkinio metaduomenyse. Analizės rezultatas – du skaitmeniniai rastriniai vaizdai – paviršiaus (su infrastruktūra, jei tokia yra) ir reljefo. (Esri, 2021)

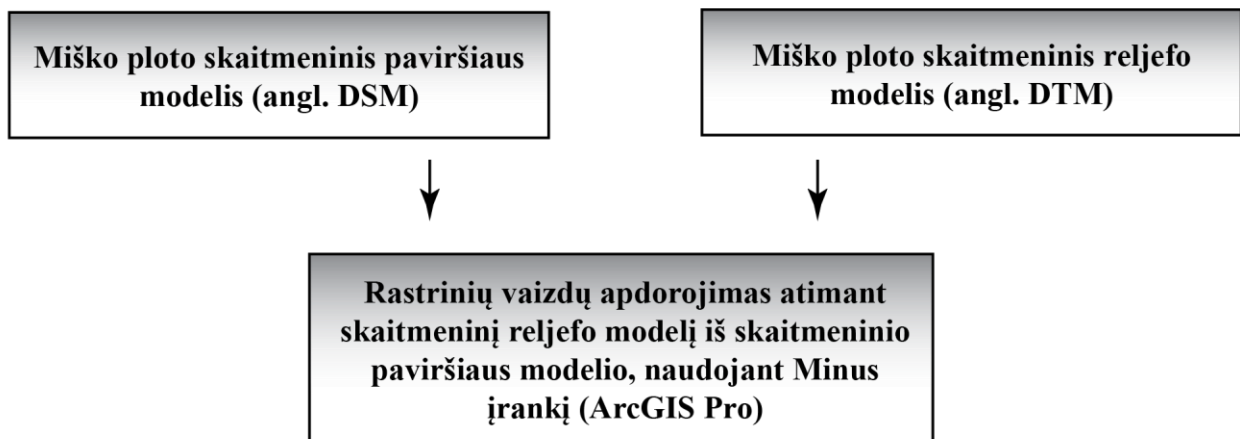
Sekanti charakteristika - miško medžių lajos tankis ir aukštis yra naudojami kaip kintamieji daugelyje aplinkosaugos sričių, pavyzdžiui, biomasės ar biologinės įvairovės vertinimui. Lajos tankis arba lajos danga – tai augmenijos ir žemės santykis, stebint atitinkamą miško plotą iš oro. Medžių lajos aukštis – tai kokiam aukštyje virš žemės paviršiaus yra medžių lajos viršūnė. LiDAR duomenys gali būti panaudoti būtent abiem šioms kintamiesiems nustatyti. Toliau pateikiami žingsniai, skirti apskaičiuoti medžių lajos tankį ir aukštį iš LiDAR taškų debesies, remiantis ESRI ArcGIS programinės įrangos dokumentacija. Pirmiausia, reikalingas atitinkamo teritorinio vieneto LiDAR taškų debesis, kuris buvo suskirstytas/suklasifikuotas į žemės grąžą (pliką žemę) ir nežeminę grąžą – šiandieniniai rinkiniai dažniausiai standartiškai tokią klasifikaciją turi. Šį taškų klasifikavimą paprastai atlieka LiDAR duomenų teikėjas. Antra, reikia atsižvelgti į tai, kada buvo surinkti LiDAR duomenys, ir į augalijos tipą tiriamoje vietoje. Jei lapuočių medžių ten daug ir duomenų surinkimas atliktas rudens metu (lapai nuplėšti) – medžių lajos tankumo skaičiavimai gali ir nepasiteisinti. Esminis momentas prieš pradėdant funkcinį skaičiavimą ir analizę ArcGIS Pro programinėje įrangoje – LAS duomenų rinkinys. Duomenų rinkinio generavimas iš bet kokio tipo pirminių duomenų, kaip ir minėta anksčiau, atliktas naudojant QGIS programinę įrangą. Čia, LAS duomenų rinkinys naudojamas apskaičiuojant medžių lajos tankį ir aukštį. Sukurtas LAS duomenų rinkinys, jau ArcGIS Pro programinėje įrangoje yra naudojamas kaip sluoksniu, tam, kad būtų galima nustatyti LiDAR filtro savybes, kurios valdys, kurie LAS duomenų rinkinio taškai bus naudojami. Šiam

žingsniui naudojama „Geoprocessing“ funkcija „Make LAS Dataset Layer“. Tai galėtų atrodyti kaip papildomas ir nereikalingas žingsnis, kadangi iš QGIS išeksportuotas LAS duomenų rinkinys jau yra tinkamas naudojimui, tačiau „Make LAS Dataset Layer“ funkcija leidžia tą duomenų rinkinį „apkarpyti“. Tai reiškia, kad nurodžius atitinkamus parametrus, galima iš LAS duomenų rinkinio pasiimti tik tai, kas yra reikalinga tyrimui, pavyzdžiui, vienai ar kitai klasei priklausančius taškus, arba vienam ar kitam filtrui priklausančius taškus. Tyrimo atveju, apibrėžiant darbinį LAS sluoksnį, pasirinktos visos LiDAR grąžos, tada dėmesys sutelktas į klasių kodus. Iš esmės, darbas atliktas su dviejais taškų rinkiniais: esančiais ant žemės paviršiaus ir esančiais virš žemės paviršiaus. LAS taškai paprastai klasifikuojami pagal schemą, apibrėžtą LAS 1.1 standarte, pagal Amerikos fotogrammetrijos ir nuotolinio stebėjimo draugijos (ASPRS) nuostatus. Pirmiausia, yra skaičiuojamas ir modeliuojamas medžių lajos tankis. (Esri, 2021) Veiksmingiausias būdas nustatyti medžių lajos tankį yra padalinti tiriamą plotą į daug mažų vienodo dydžio vienetų naudojant rastrinių vaizdų technologiją. Kiekviename rastrinio vaizdo langelyje yra atliekamas palyginamas tarp virš žemės esančių taškų su bendru taškų skaičiumi. Toks sprendimas įgyvendinamas naudojant „LAS Point Statistics as Raster“ funkciją. Labai svarbus momentas, yra nustatyti tinkamą ląstelių dydį (angl. sampling value) šiai analizei - jis turi būti bent keturis kartus didesnis už vidutinį atstumą tarp taškų, kuris dažniausiai nurodomas duomenų rinkinio metaduomenyse. Naudojant „LAS Point Statistics as Raster“ įrankį su ant žemės paviršiaus esančiais taškais, pasirenkamas metodas „POINT_COUNT“. Sekantis žingsnis yra pašalinti „NoData“ langelius ir paversti juos nuliais tam, kad tolesnėse operacijose atitinkamas langelis be taškų būtų traktuojamas kaip nulis arba tuščias - tai atliekama naudojant „IsNull“ ir „Con“ įrankius. Identiškas procesas pakartojamas ir ant žemės paviršiaus esančių taškų sluoksniui. Atlikus pirmąjį ir antrąjį žingsnius abiem duomenų rinkiniams, abu rastriniai vaizdai yra sujungiami siekiant gauti bendrą ląstelių skaičių, naudojant „Plus“ įrankį. Kadangi iki šio žingsnio visi sukurti rastriniai vaizdai turi „long“ tipo skaičius be slankiojančio kablelio, papildomai sukuriama sujungto rastrinio vaizdo kopija, turinti „double“ tipo skaičius su slankiojančiu kableliu, naudojant „Float“ įrankį. Sekantis žingsnis apima dviejų rastrinių vaizdų: virš žemės paviršiaus esančių taškų ir slankiojantį kablelį turinčių bendrų taškų. Tokio skaičiavimo rezultatai gali varijuoti nuo 0,0 iki 1,0, kur 0,0 reiškia, kad medžių lajos nėra, o 1,0, kur medžių laja yra labai tanki. Tokie kartografiniai modeliai dažniausiai yra vizualizuojami skirtingo ryškumo žalia spalva, kurioje šviesiausios sritys reiškia itin mažą arba jokio medžių lajos kiekį, o tamsesnės sritys demonstruoja tankesnę medžių lają. (Esri, 2019)



6 pav. Miško medžių lajos tankio analizės schema

Antra, atliekami medžių lajos aukščio skaičiavimai. Čia procesas yra ne toks detalus ir kiek paprastesnis, kadangi šiek tiek persipina su ankstesnio miškotyros komponento analizės rezultatais. Norint nustatyti medžių lajos aukštį, yra reikalingi du rastriniai vaizdai: skaitmeninis paviršiaus modelis (angl. DSM) ir skaitmeninis reljefo modelis (angl. DEM). Šie duomenų rinkiniai yra paimami iš pirmosios tyrimo metodologinės analizės dalies „paviršius, reljefas ir infrastruktūra“. Turint sugeneruotus skaitmeninius paviršiaus ir reljefo modelius, naudojamas įrankis „Minus“, kuriame iš skaitmeninio paviršiaus modeliu yra atimamas skaitmeninis reljefo modelis, o rezultatas – būtent medžių lajos aukštis. Sugeneruoto rastrinio vaizdo simbologija dažniausiai atspindi ląsteles, kuriose medžių lajos aukštis yra didesnis kiek intensyvesne spalva, pavyzdžiui, raudona, o ten, kur medžių lajos aukštis yra santykinai mažas – mažiau intensyvia, pavyzdžiui, tamsiai mėlyna spalva. (Esri, 2019)



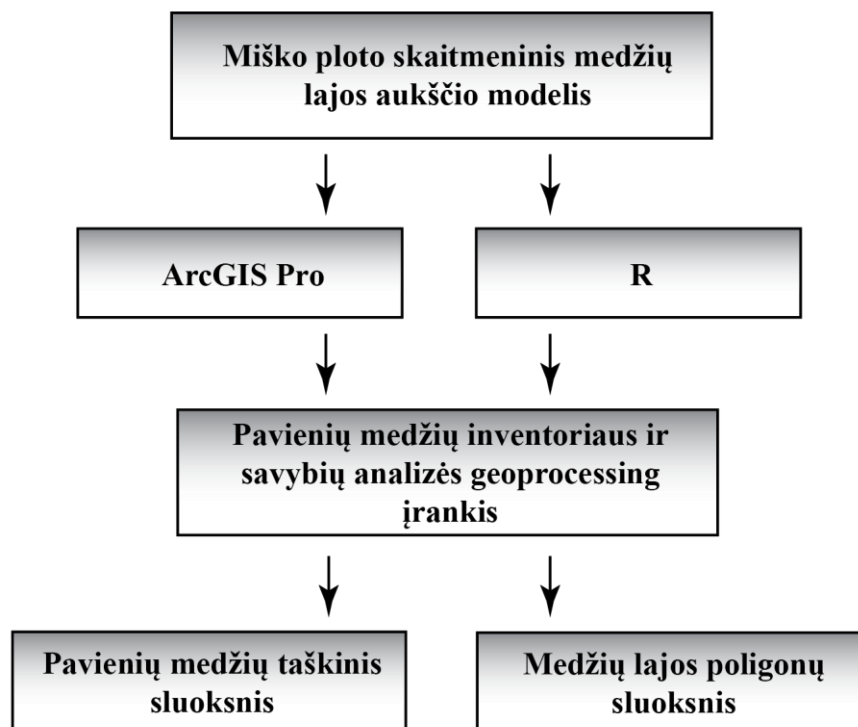
7 pav. Miško medžių lajos aukščio analizės schema

Trečioji charakteristika – individualių medžių inventorių ir savybės. Individualių medžių inventorių ir savybės yra svarbus miškų būklės komponentas, leidžiantis įvertinti atitinkamo miško ploto pokyčius laike ir būklę pavienių medžių kontekste. Šiam analizės etapui yra naudojami anksčiau vykdyto etapo sugeneruoti rezultatai, juos papildant R programavimo kalbos šaltinio kodu. Pirmiausia, reikalingas aukštos raiškos medžių lajos aukščio rastras, kuris buvo sukurtas praeitame etape. Papildomai yra sukuriamas „tiltas“ tarp R ir ArcGIS Pro, naudojantis ESRI programinės įrangos R palaikymo galimybe. Šiam analizės etapui yra reikalingas bendrasis R integracinis paketas, kuris susiejamas su ArcGIS Pro. Šaltinio R kodas įgyvendina „kintamojo lango filtro“ (angl. vwf) algoritmą, kuris sukuria judantį langą, nuskaitytą medžių lajos aukščius, o jei nustatoma, kad tam tikra ląstelė yra aukščiausia lange, ji pažymima kaip medžio viršūnė. Minėto algoritmo lango dydis yra konfigūruojamas priklausomai nuo atitinkamos tyrimų srities ir medžių lajos dydžio joje. Paprastai

ąžuolai turi didesnę medžių lają nei šiaurinės kietmedžio rūšys, o subrendę medžiai turi didesnę lają nei nesubrendę medžiai. Numatytasis šaltinio kodas naudoja funkciją, kad nustatytų paieškos lango dydį, kur x reiškia medžių lajos aukštį virš žemės toje vietoje. Lango dydis modifikuojamas keičiant „lin“ kintamąjį pagal formulę: $lin <- function(x)\{x * .05 + 3.5\}$. ArcGIS Pro programinėje įrangoje yra sukuriamas naujas įrankio failas, kuriam nurodomas kelias į jau su programine įranga susietą R šaltinio kodą. Įrankio failo parametruose yra nustatomi jo įvesties ir išvesties kintamieji:

- Input Tree Canopy Height Raster (miško ploto skaitmeninis medžių lajos aukščio modelis);
- Input Minimum Tree Height (kintamasis x);
- Output Tree Point Shapefile (pavienių medžių taškinis sluoksnis);
- Output Tree Crown Polygon Shapefile (medžių lajos poligonų sluoksnis). (SRBC, 2022)

Taip sukuriamas naujas „geoprocessing“ įrankis, kuris paremtas R šaltinio kodu, jis turi tokią pat vartotoją sąsają kaip ir bet kuris sisteminis įrankis, tačiau turi R šaltinio kodui priklausančius įvesties ir išvesties kintamuosius. Paleidus įrankį sugeneruojami du išvesties erdviniai sluoksniai: pavienių medžių taškinis ir medžių lajos poligonų. Abiejų išvesties erdvinių sluoksnių atributinės lentelės papildomos medžių aukščio ir spindulio atributais. Šaltinio R kodo funkcija pridedama prieduose (**1 priedas**).



8 pav. Miško individualių medžių inventoriaus ir savybių analizės schema

Visi šie trys analizės etapai sudaro miško būklės įvertinimo modelį, naudojantis LiDAR duomenimis. Analizės rezultatai verifikuojami, visu pirma, lyginant tris skirtingus miškų plotus Labanoro-Pabradės girios tiriamajame plote, taip užtikrinant modelio efektyvumą ir vientisumą. Toliau, gauti ir apibendrinti kartografiniai modeliai bei analizės išvados yra lyginamos su Lietuvos ir užsienio literatūra, siekiant išsiaiškinti, ar tyrimas generuoja validžius rezultatus. Atlikus palyginimą ir tyrimo rezultatų bei modelio verifikavimą, pateikiamos išvados apie LiDAR taikymo galimybes miškotyroje Lietuvoje, naudojant valstybinius Lidar_DR_LT - skaitmeniniai erdviniai lazerinio skenavimo taškų duomenys (2019-2021 m.) duomenų rinkinius.

3. TYRIMO REZULTATAI

3.1. Miško ploto komponentinis vertinimas, taikant LiDAR duomenis

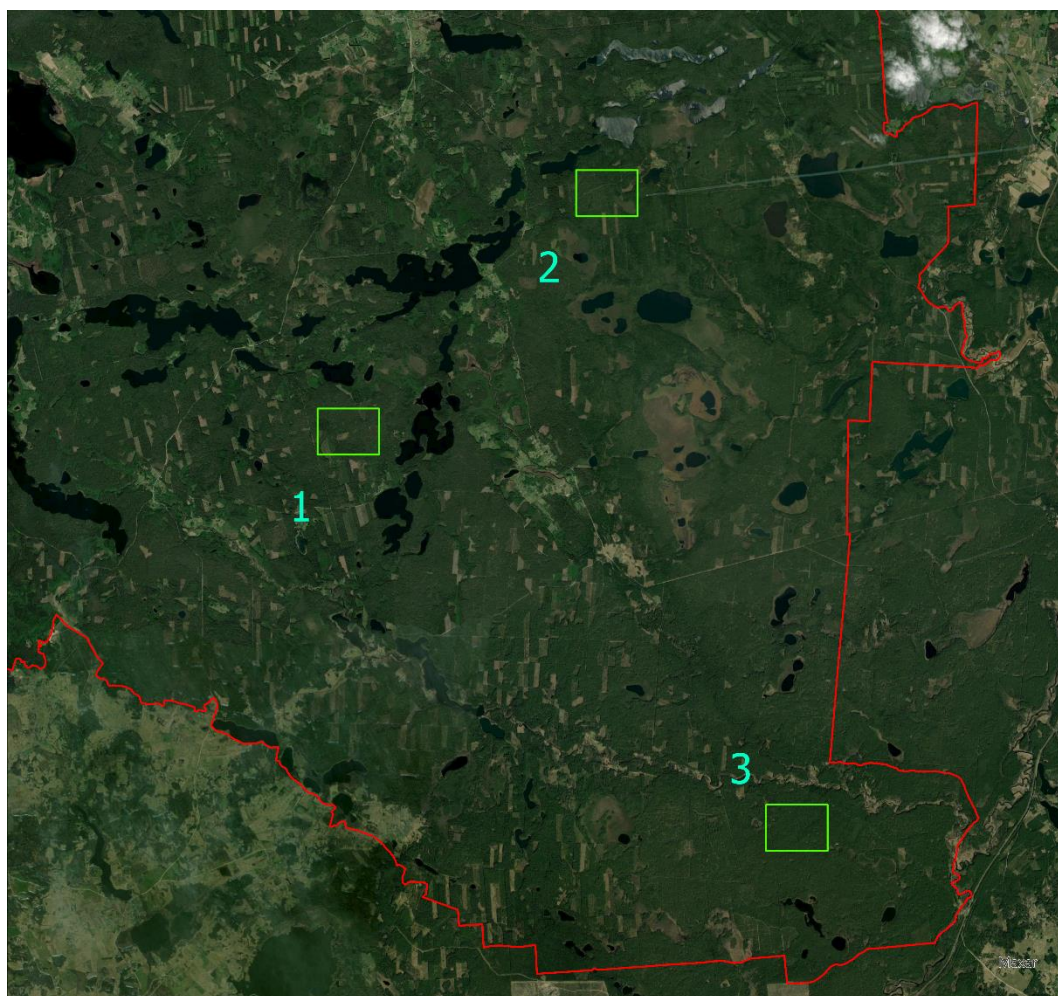
Kaip jau buvo minėta darbo metodikos dalyje, analizuojama teritorija buvo suskirstyta į tris vienodo dydžio mažesnius teritorinius vienetus. Šie teritoriniai vienetai paeiliui sunumeruoti patogesniai referavimui į juos, taip pat, siekiant sumažinti klaidų kiekį ir sumaištį analizuojant iš skirtingų teritorinių vienetų generuojamus rezultatus bei lyginant juos tarpusavyje (**9 pav.**). Pirmiausia, pagal bendrąją darbo metodinę schemą, buvo paskaičiuota kiekvienos iš sunumeruotų teritorijų taškų debesų statistinė išraiška, naudojant „*LAS Point Statistics By Area*“ įrankį. Statistinė LiDAR taškų debesies išraiška leidžia susidaryti pirmąjį įspūdį apie duomenų rinkinį su kuriuo dirbama, taip pat įvertinti jo panaudojimo galimybes:

1 lent. Statistinė LiDAR metodo taškų masių informacija

Teritorijos Nr.	Z_Min	Z_Max	Z_Vid	Taškų sk.	SD
1	151,96	254,87	174,63	28301389	10,58
2	148,26	246,08	168,79	29416555	11,51
3	136,20	249,22	156,94	30219650	9,93

Esminis momentas čia, į kurį vertėtų atkreipti dėmesį yra taškų skaičiaus reikšmė, kuri reiškia realų taškų skaičių kiekviename iš teritorinių vienetų. Kaip bus matoma toliau, taškų skaičius ir tankis gana stipriai įtakoja taškų debesies panaudojimo galimybes generuojant tam tikro tipo rezultatus, todėl svarbu įvertinti šią taškų debesies charakteristiką. Šiuo atveju, matomas tam tikras progresyvus taškų skaičiaus didėjimas einant nuo vienos teritorijos prie kitos. Iš esmės, taškų skaičių tam tikroje teritorijoje gali įtakoti tiek duomenų rinkimo metodai, techninė ir programinė įranga, tiek pačios teritorijos specifika. Tyrimo atveju, taškų skaičius skirtingose teritorijose varijuoja nuo kiek daugiau

nei 28 mln. iki šiek tiek daugiau nei 30 mln. taškų atitinkamai. Žvelgiant į kitas LiDAR taškų debesų charakteristikas, verta atkreipti dėmesį ir į aukščių reikšmes, kurios bus aktualios kitame tyrimo etape. Čia turime Z_Min , Z_Max ir Z_Vid reikšmes, kurios reiškia mažiausių, didžiausių ir vidutinių aukščio taškų reikšmes. Šios reikšmės yra svarbios todėl, kad kai yra generuojami teritorijos skaitmeniniai paviršiaus ir reljefo modeliai, jie atlieka savotišką verifikavimo vaidmenį. Tai reiškia, kad sugeneruotų rastrinių vaizdų aukščių reikšmės, bent jau teoriškai, neturėtų skirtis nuo taškų debesies reikšmių. Priešingu atveju, skirtingos reikšmės gali sufleruoti apie netinkamai parinktą interpoliacijos metodą ar kitus parametrus bei netinkamą programinės įrangos veikimą. Standartinis taškų debesies aukščių reikšmių nuokrypis „ SD “, skaitine išraiška parodo teritorijos aukščių reikšmių tolygumą, t. y. esant didesnei reikšmei aukščių taškai varijuoja labiau, tuo tarpu esant mažesnei – mažiau. Iš to galima susidaryti pirmąjį įspūdį apie teritorijos paviršiaus ir reljefo ypatumus. Tai reiškia, kad iš statistinės išraiškos galime įvertinti analizuojamos teritorijos reljefo kalnuotumo arba lyguotumo intensyvumus.



9 pav. Sunumeruoti smulkesni tyrimo teritoriniai vienetai

Sekantis etapas būtų įvertinti ne tik bazines taškų debesų charakteristikas, tačiau pasigilinti ir į duomenų rinkinių struktūrą. Čia pasitelktas įrankis „LAS Dataset Statistics“, kuris aukščiau pateiktą statistinę taškų debesies išraišką suskaido į LiDAR taškų debesies grąžas (angl. *return*), klases (angl. *class*) ir kitus papildomus parametrus. Šio tyrimo atveju, ne visos iš generuojamų statistinių išraiškų yra aktualios (pvz. RGB, intensyvumo ar skenavimo kampo), todėl pateikiama lentelė sudaryta ne iš visų įrankio generuojamų rezultatų. Čia parinkti tik tyrimui aktualūs ir „pilni“ bei „švarūs“ duomenys:

2 lent. Detalesnė statistinė LiDAR metodo taškų masyvų informacija (Nr. 1)

Elementas	Kategorija	Taškų sk.	Procentai	Z_Min	Z_Max
<i>First</i>	Grąža	13544691	47,86	151,96	254,87
<i>Second</i>	Grąža	9005969	31,82	151,98	199,81
<i>Third</i>	Grąža	4278397	15,12	151,99	198,14
<i>Fourth</i>	Grąža	1249678	4,42	152,03	196,90
<i>Fifth</i>	Grąža	222654	0,79	152,07	194,11
<i>Last</i>	Grąža	13528164	47,80	151,96	235,52
<i>Single</i>	Grąža	4544036	16,06	151,96	235,52
<i>First_of_Many</i>	Grąža	9000655	31,80	153,07	254,87
<i>Last_of_Many</i>	Grąža	8984128	31,74	151,98	199,68
<i>1_Unclassified</i>	Klasė	517	0,00	152,70	166,44
<i>2_Ground</i>	Klasė	5172245	18,28	151,96	166,82
<i>3_Low_Vegetation</i>	Klasė	1023728	3,62	152,12	167,07
<i>4_Medium_Vegetation</i>	Klasė	553084	1,95	152,68	168,65
<i>5_High_Vegetation</i>	Klasė	15031188	53,11	154,21	200,71
<i>7_Low_Point(noise)</i>	Klasė	465	0,00	152,94	165,50
<i>12_Overlap_Points</i>	Klasė	6520162	23,04	152,05	254,87

„LAS Dataset Statistics“ įrankio pagalba sugeneruotos lentelės padeda pilnai įsigilinti į duomenų rinkinio, su kuriuo dirbama struktūrą. Čia rezultatai yra išskaidyti į grąžas ir klases. Kiekviena iš šių kategorijų turi charakteristikas: taškų skaičių, procentinį taškų skaičiaus dydį nuo viso skaičiaus bei aukščio mažiausias ir didžiausias reikšmes. Kiekvienas rodiklis atitinka tam tikro elemento reikšmes pagal kategoriją. Pavyzdžiui, elementas „*First*“ (arba angl. *First Return*), vadinama „pirmoji grąža“ patenka į kategoriją „Grąža“ ir turi savo individualius rodiklius arba

elementas „*1_Unclassified*“, vadinamas „neklasifikuoti taškai“ patenka į kategoriją „Klasė“ ir taip pat turi savo individualius rodiklius.

3 lent. Detalesnė statistinė LiDAR metodo taškų masių informacija (Nr. 2)

Elementas	Kategorija	Taškų sk.	Procentai	Z_Min	Z_Max
<i>First</i>	Grąža	13747803	46,73	148,33	246,08
<i>Second</i>	Grąža	9311417	31,65	148,29	197,50
<i>Third</i>	Grąža	4650770	15,81	148,26	196,48
<i>Fourth</i>	Grąža	1437166	4,89	148,26	194,69
<i>Fifth</i>	Grąža	269399	0,92	148,28	193,50
<i>Last</i>	Grąža	13724583	46,66	148,26	227,39
<i>Single</i>	Grąža	4440770	15,10	148,33	227,39
<i>First_of_Many</i>	Grąža	9307033	31,64	149,07	246,08
<i>Last_of_Many</i>	Grąža	9283813	31,56	148,26	197,50
<i>1_Unclassified</i>	Klasė	603	0,00	148,68	165,14
<i>2_Ground</i>	Klasė	5291139	17,99	148,26	165,70
<i>3_Low_Vegetation</i>	Klasė	1049228	3,57	148,43	165,99
<i>4_Medium_Vegetation</i>	Klasė	510287	1,73	148,79	167,26
<i>5_High_Vegetation</i>	Klasė	14912069	50,69	150,43	198,61
<i>7_Low_Point(noise)</i>	Klasė	1068	0,00	148,58	163,65
<i>12_Overlap_Points</i>	Klasė	7652161	26,01	148,29	246,08

Tokie skaičiavimai atlikti su visomis taškų debesyje randamomis grąžomis ir klasėmis. Gautas rezultatas – visų trijų analizuojamų teritorijų LiDAR taškų debesų statistinė analizė. Pirmiausia, svarbu atkreipti dėmesį į taškų skaičių, kaip ir anksčiau pateiktoje statistinėje išraiškoje. Kadangi čia taškų skaičius yra suskirstytas ir į grąžas ir į klases, galima išskirti ir akcentuoti tyrimui aktualias duomenų rinkinio dalis bei įvertinti jo galimybes dar prieš pradėdant generuoti rezultatus. Atsižvelgiant į tai, kad šiame darbe pagrinde buvo naudojami žemės (angl. *ground*) ir pirmosios grąžos (angl. *first return*) taškai, galima įvertinti jų parametrus. Pirmosios teritorijos atveju, klasė taškų, klasifikuojamų kaip žemė yra sudaryta iš 5172245 taškų, kurie sudaro 18,28 % viso taškų debesies. Papildomai, galima atkreipti dėmesį ir į aukščių reikšmes, kurios bus aktualios kitame tyrimo etape – mažiausia reikšmė čia yra 151,96 m, o didžiausia – 166,82 m. Pirmosios grąžos atveju, 47,86 procentus taškų debesies užimanti LiDAR duomenų rinkinio dalis turi 13544691 taškus.

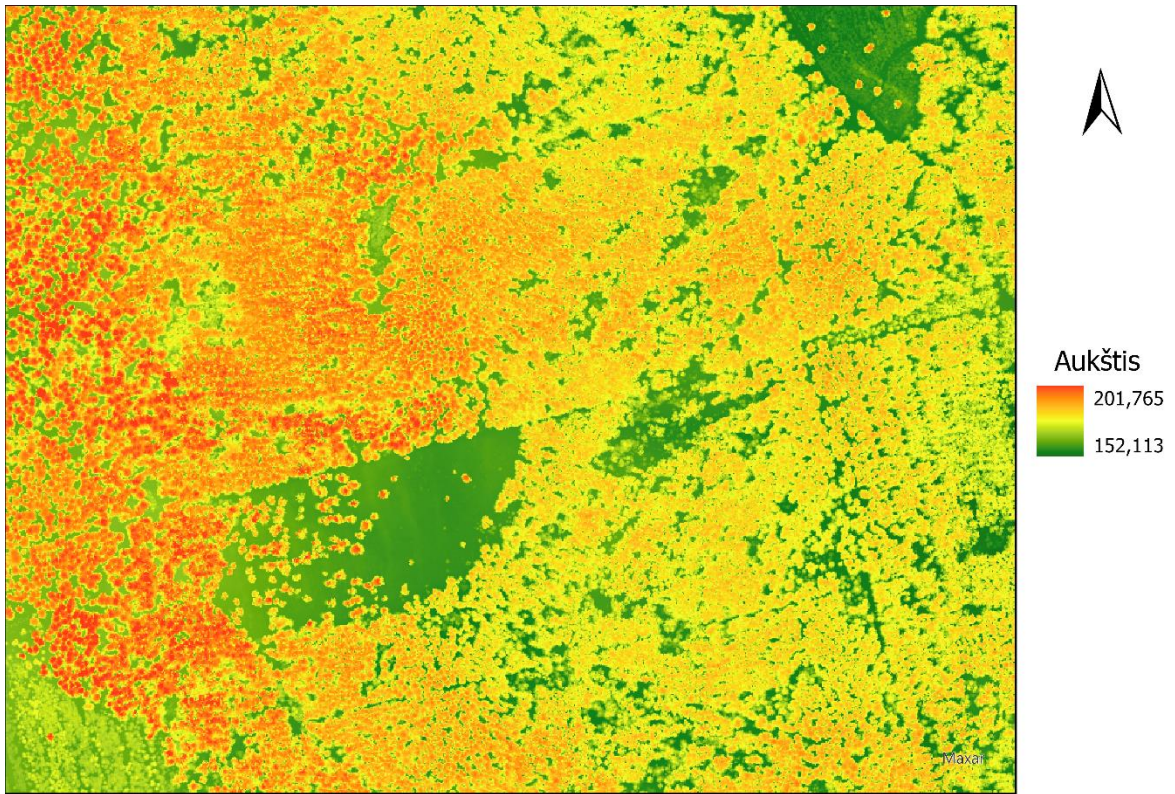
4 lent. Detalesnė statistinė LiDAR metodo taškų masyvų informacija (Nr. 3)

Elementas	Kategorija	Taškų sk.	Procentai	Z_Min	Z_Max
<i>First</i>	Grąža	13165019	43,56	136,23	249,22
<i>Second</i>	Grąža	9662594	31,97	136,20	184,62
<i>Third</i>	Grąža	5266610	17,43	136,20	183,63
<i>Fourth</i>	Grąža	1774271	5,87	136,21	181,40
<i>Fifth</i>	Grąža	351156	1,16	136,25	179,84
<i>Last</i>	Grąža	13140446	43,48	136,20	185,85
<i>Single</i>	Grąža	3510937	11,62	136,23	185,85
<i>First_of_Many</i>	Grąža	9654082	31,95	137,11	249,22
<i>Last_of_Many</i>	Grąža	9629509	31,87	136,20	184,62
<i>1_Unclassified</i>	Klasė	1463	0	136,64	152,63
<i>2_Ground</i>	Klasė	6486638	21,46	136,23	153,05
<i>3_Low_Vegetation</i>	Klasė	365326	1,21	136,40	153,28
<i>4_Medium_Vegetation</i>	Klasė	213993	0,71	137,02	154,91
<i>5_High_Vegetation</i>	Klasė	15271833	50,54	138,34	185,85
<i>7_Low_Point(noise)</i>	Klasė	189	0,00	137,13	151,41
<i>12_Overlap_Points</i>	Klasė	7880208	26,08	136,20	249,22

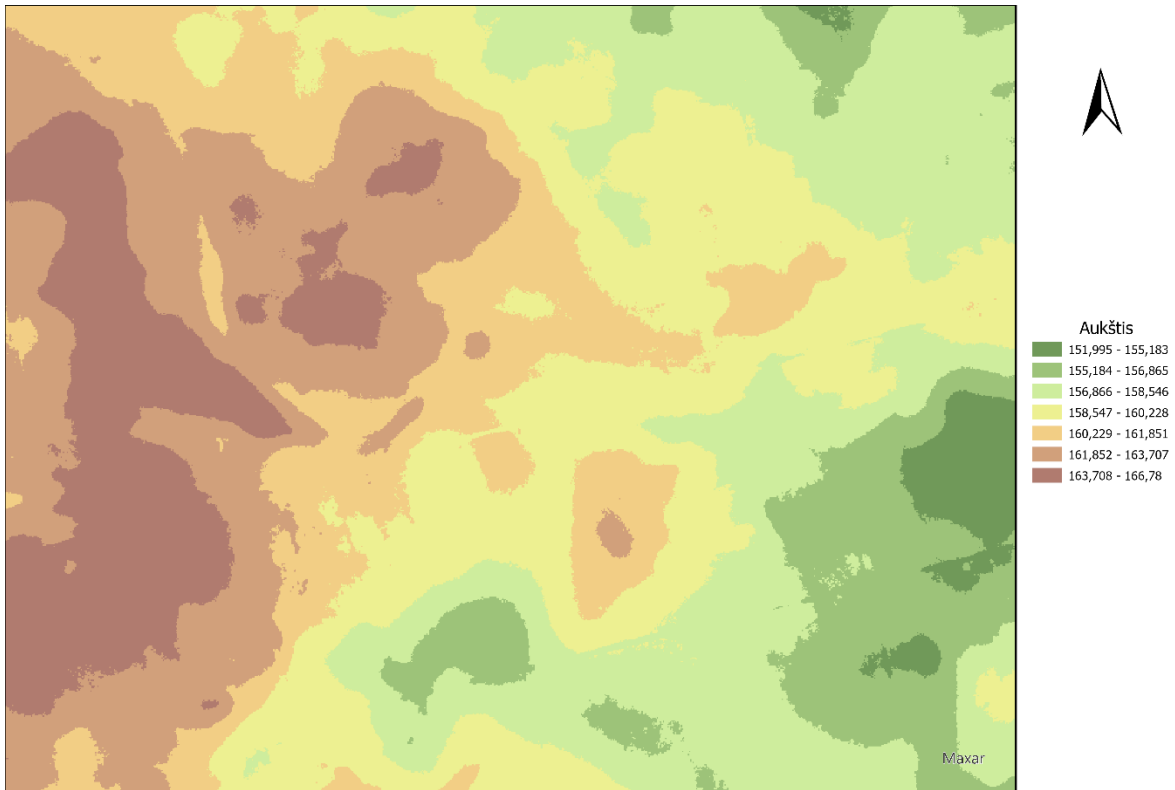
Atkreipiant dėmesį į tai, kad žemės taškų duomenų rinkinio dalyje yra gerokai mažiau, galima susidaryti nuomonę, kad generuojamo rastrinio vaizdo rezultatas gali būti mažiau tikslus. Vis dėl to, generuojant skaitmeninius reljefo modelius, beveik visais atvejais yra pasitelkiami programinėje įrangoje naudojami jau paruošti interpoliacijos metodai (pvz. *IDW*), kurie dažniausiai ir yra naudojami tokio tipo produktų kūrimui. Tuo tarpu, pirmosios grąžos atveju, didesnis taškų kiekis leidžia generuoti gerokai detalesnį ir tikslesnį rastrinį vaizdą, kadangi ši LiDAR duomenų rinkinio dalis dažniausiai yra naudojama vertinant miško ploto paviršių su visais ant jo esančiais objektais, medžių lajos struktūrą ir kitus parametrus. Šiuo atveju, interpoliacija atlieka kiek mažesnę vaidmenį nei skaitmeninių reljefo modelių kūrimo procese, todėl didesnis taškų skaičius ir reiškia tikslesnį bei detalesnį skaitmeninį modelį. Generuojant skaitmeninius reljefo ir paviršiaus modelius, beveik visais atvejais yra naudojami žemės ir pirmosios grąžos taškai, todėl į jų charakteristikas dažniausiai pagrindinis dėmesys ir yra atkreipiamas. Tyrimo atveju, tiek skaitmeniniam reljefo, tiek paviršiaus modeliams generuoti duomenų rinkinio struktūra yra tinkama, o taškų kiekis ir tankis yra pakankami.

Žvelgiant į kitų dviejų teritorijų taškų masyvų informaciją, vaizdas yra labai panašus. Tiek taškų skaičius, tiek procentinė jų dalis varijuoja maždaug panašiais intervalais, o aukščių reikšmės skiriasi atitinkamai pagal teritorijos specifiką. Bet kokių atveju, žemės taškų dalis visose trijose teritorijose turi sąlyginai mažiau taškų nei pirmosios gražos dalis, tačiau tai yra įprasta, kadangi lazerio spinduliui pasiekti žemės paviršių visada yra sunkiausia. 5-6 mln. žemės taškų sąlyginai mažoje teritorijoje leidžia generuoti pakankamai patikimus, tikslius ir detalius rezultatus. Tuo tarpu, 13-14 mln. pirmosios gražos taškų, daugeliu atveju, leidžia įvertinti net smulkesnes analizuojamos teritorijos detales, kas yra ganėtinau aktualu generuojant skaitmeninius paviršiaus modelius arba analizuojant miško ploto medžių lają. Kadangi visai bendrajai tyrimo teritorijai buvo naudojamas tas pats duomenų rinkinys, didesnių nuokrypių skirtingose jos dalyse čia neturėtų būti. Kaip ir minėta, tam tikrose vietose tiek taškų skaičius, tiek tankis, tiek tikslumas gali neženkliai skirtis, tačiau bendros duomenų rinkinio ir taškų debesų charakteristikos leidžia atlikti gana įvairiapusišką bei detalią teritorijos analizę. Šie LiDAR duomenų rinkiniai, turint omenyje ir jų aukščiau pateiktus statistinius rodiklius, toliau panaudojami sekančiame tyrimo etape. (Esri, 2021)

Sekanti darbo dalis apima miško paviršiaus ir reljefo analizę. Kaip ir minėta, LiDAR duomenys yra vieni patikimiausių ir šiuo metu dažniausiai naudojamų erdvinių duomenų šaltinių generuojant skaitmeninius paviršiaus (angl. *DSM*) ir skaitmeninius reljefo (angl. *DEM*) teritorijos modelius. Sekančiam tyrimo etapui visoms trimis išskirtoms teritorijoms sugeneruoti skaitmeniniai paviršiaus ir reljefo modeliai. Pirmiausia, pagal aprašytą darbo metodiką, sukurtas skaitmeninis paviršiaus modelis. Skaitmeninis paviršiaus modelis miškingoje teritorijoje leidžia pakankamai detaliai įvertinti analizuojamos teritorijos tiek gamtines, tiek antropogenines charakteristikas. Paviršius – tai analizuojamos teritorijos žemės paviršius su visais ant jo esančiais objektais. Tai reiškia, kad paviršiaus modelyje akcentuojamas yra ne plikos žemės paviršiaus aukštis, tačiau bendras visos teritorijos aukštis. Bet kokių atveju, jei analizuojamoje teritorijoje atsiranda vietų, kuriose augalijos, infrastruktūros ar kitų objektų nėra, tuomet yra paimamas taškas, klasifikuotas kaip žemė. Be to, skaitmeninis paviršiaus modelis miškingoje vietovėje taip pat leidžia įvertinti ir tam tikras medynų būklės charakteristikas, pvz. medžių lajos aukščiausius taškus. Skaitmeninio paviršiaus modelio pagalba taip pat galima įžvelgti ir išskirti žmogaus ūkinės veiklos padarinius, pvz. kirtavietes, pastatus ar tokią infrastruktūrą kaip miško kelius. Identiškai ankstesniajam tyrimo etapui, skaitmeniniai paviršiaus modeliai yra sugeneruoti visoms trimis teritorijoms. Rezultatas – 10 m rezoliucijos rastrinis vaizdas su aukščių reikšmėmis. Čia jis simbolizuotas žalios-geltonos-raudonos spalvos skalėje, siekiant geriau išryškinti žemesnes ir kiek aukštesnes analizuojamos teritorijos vietas.

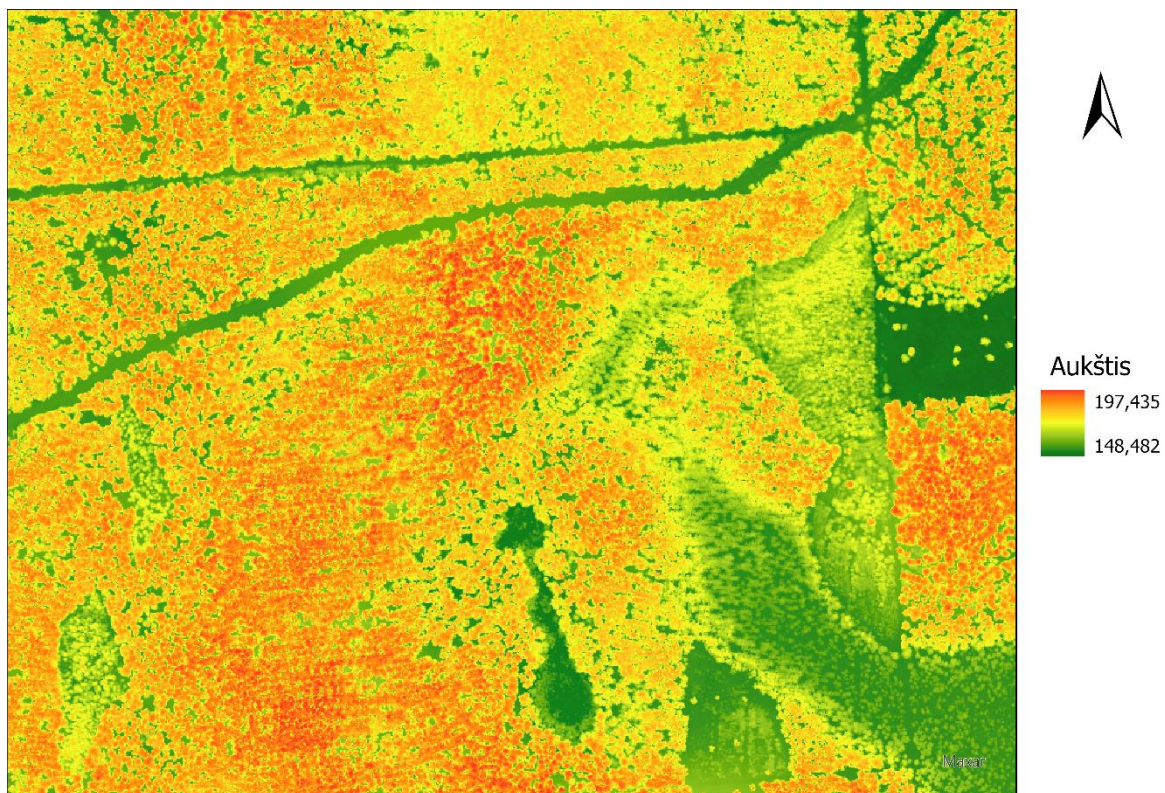


10 pav. Skaitmeninis paviršiaus modelis (Nr. 1)

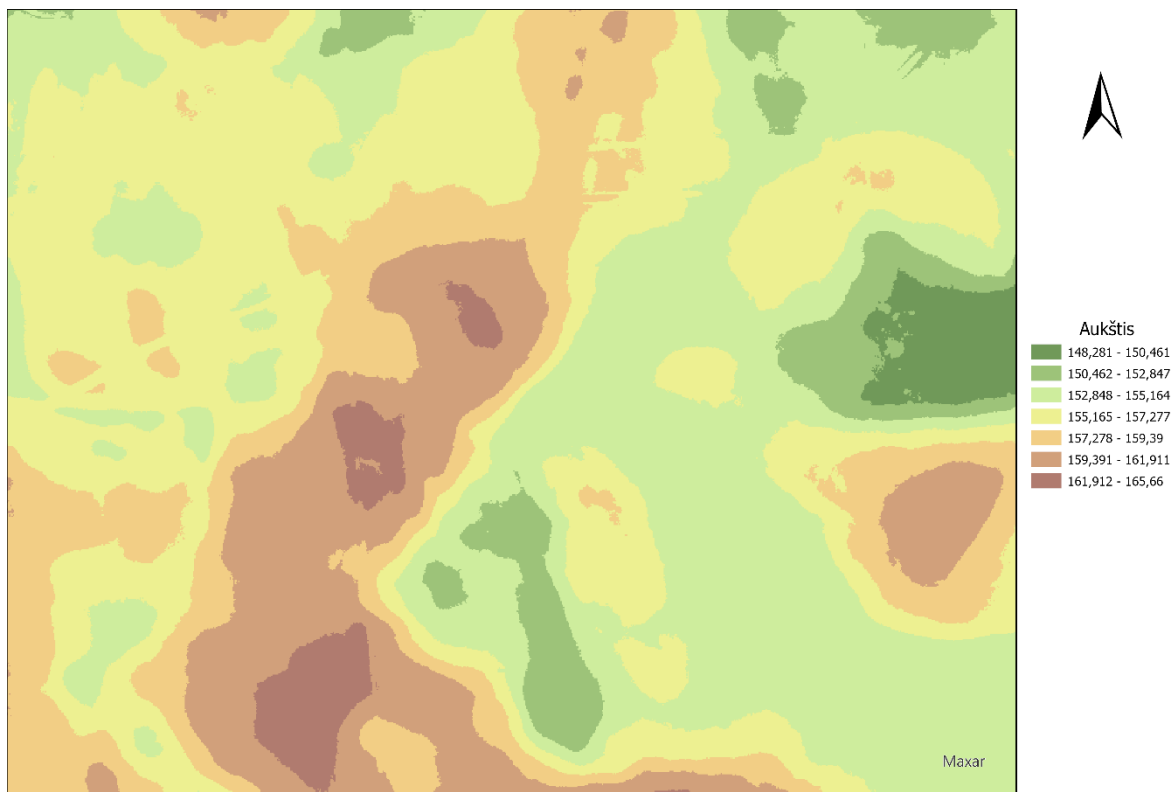


11 pav. Skaitmeninis reljefo modelis (Nr. 1)

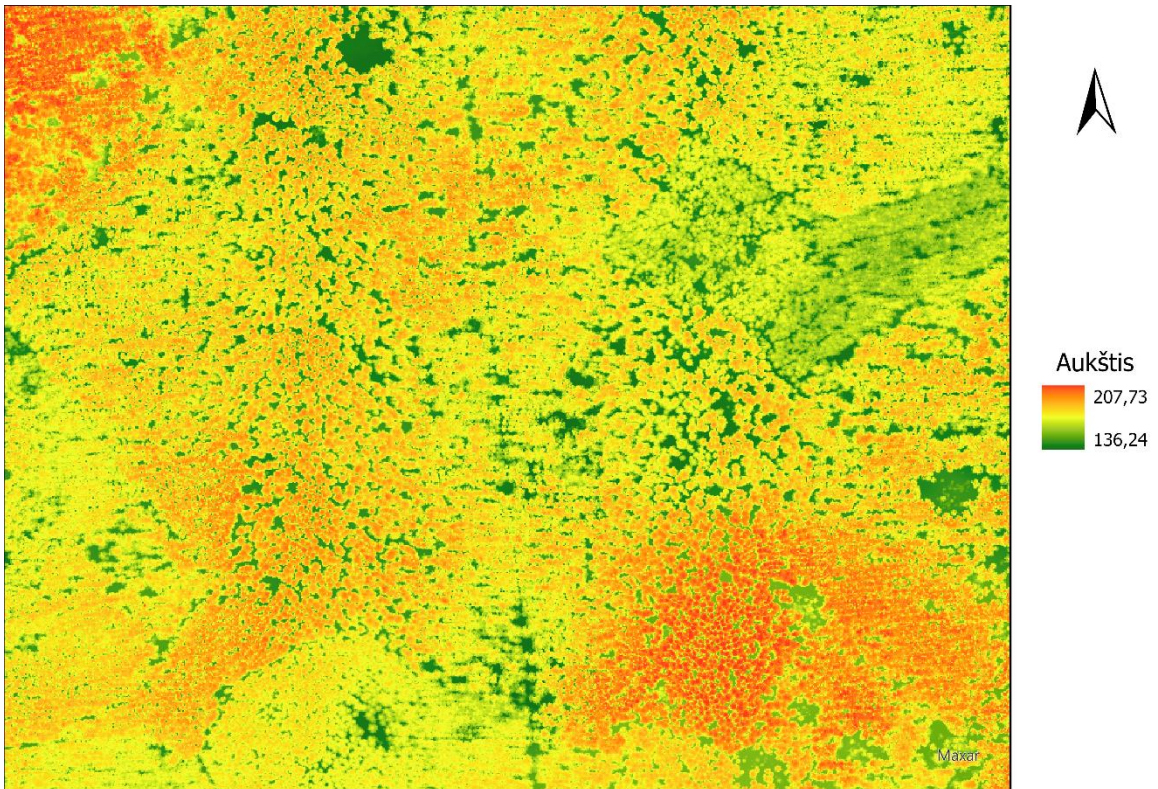
Pirmausia, verta atkreipti dėmesį į tai, kad tos pačios teritorijos rastriniai vaizdai turi skirtingus simbologijos parametrus, todėl matomas vaizdas atrodo gana skirtingai. Skaitmeninio paviršiaus modelio atveju, yra parinkta nuolatinė (angl. *continuous*) spalvų skalė, tuo tarpu skaitmeninis reljefo modelis turi klasifikuotas reikšmes su joms priskirtomis spalvomis. Toks sprendimas priimtas todėl, kad tiek vienas, tiek kitas rastriniai vaizdai atlieka skirtingas funkcijas ir turi skirtingą pritaikomumą. Kaip ir minėta, skaitmeninis paviršiaus modelis išryškina bendrą teritorijos vaizdą, t. y. tiek medynų pasiskirstymą, tiek infrastruktūrą (jei ji yra). Tuo tarpu, skaitmeninis reljefo modelis vaizduoja teritorijos reljefo ypatumus: aukštumas, lygumas, peraukštėjimus, pažemėjimus ir t. t. Nors šie skaitmeniniai modeliai ir turi savitų vizualinių skirtumų, juos lyginant tarpusavyje galima įžvelgti ir tam tikrų panašumų. Pavyzdžiui, tiek paviršiaus, tiek reljefo modeliuose, pirmosios teritorijos vakarinė dalis yra akivaizdžiai aukštesnė nei rytinė. Kadangi skaitmeninis paviršiaus modelis vaizduoja tiek žemės paviršių, tiek medynus ir infrastruktūrą, esančius ant jo, o reljefo modelis vaizduoja tik pliką žemės paviršių, čia pastebima ir tendencija – ant aukštesnio žemės paviršiaus esantys medynai yra bendrai aukščiau visos teritorijos atžvilgiu. Toliau sugeneruotos dar dvi skaitmeninių paviršiaus ir reljefo modelių poros likusioms dviem teritorijoms. Čia galima pastebėti gana panašias tendencijas kaip ir pirmojoje – aukščiau esančios medžių viršūnės tiesiogiai koreliuoja su aukštesne reljefo išraiška (**12, 13 pav.**) Žvelgiant į trečiąją teritoriją (**14, 15 pav.**) galima taip pat pastebėti panašią situaciją, tačiau čia, dėl teritorijos specifikos, galima matyti ir didesnių medžių viršūnių aukščio reikšmių gerokai žemesnėse reljefo srityse. Šis pavyzdys parodo, kad koreliacija tarp medžių viršūnių aukščių ir reljefo aukščio ne visada bus identiška. Lyginant skaitmeninių paviršiaus ir reljefo modelių aukščių reikšmes su anksčiau pateiktomis statistinėmis reikšmėmis, čia didelių variacijų nepastebėta: visų trijų teritorijų atveju reikšmės varijuoja 0,05-0,1 m intervale, todėl galima teigti, kad LiDAR duomenų rinkiniai ir jų pagalba generuojami skaitmeniniai modeliai yra gana tikslūs vienas kito atžvilgiu. Bendrai, skaitmeniniai reljefo modeliai taip pat gali pasitarnauti ir miško plotų žemėnaudos planavimo, įvairių tipų, susijusių su miškingomis vietovėmis, projektų valdymo, miško dirvožemio tyrimų ir miško hidrologijos kontekstuose. Gana plačiai paplitusi metodika vertinant miško plotų būklę yra tiesiogiai susijusi su miško medžių lajos aukščio modeliais, kurių pirmtakai būtent ir yra skaitmeniniai paviršiaus bei reljefo modeliai, o jų skirtumas gali būti vertinamas kaip medžių lajos aukščio modelis, reiškiantis medžių aukštį teritorijoje virš žemės paviršiaus. Šis procesas ir jo produktai aptarti sekančioje darbo dalyje kartu su pritaikytais metodais bei sugeneruotais rezultatais. (Esri, 2021)



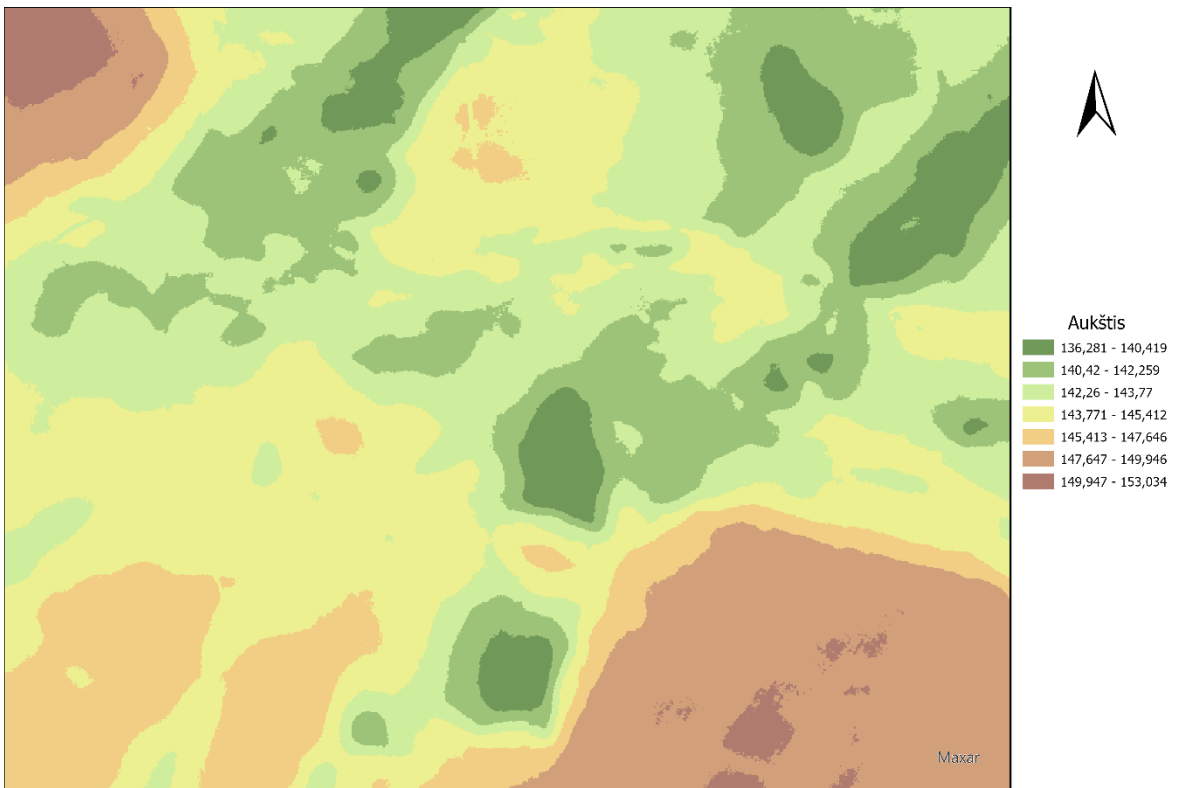
12 pav. Skaitmeninis paviršiaus modelis (Nr. 2)



13 pav. Skaitmeninis reljefo modelis (Nr. 2)

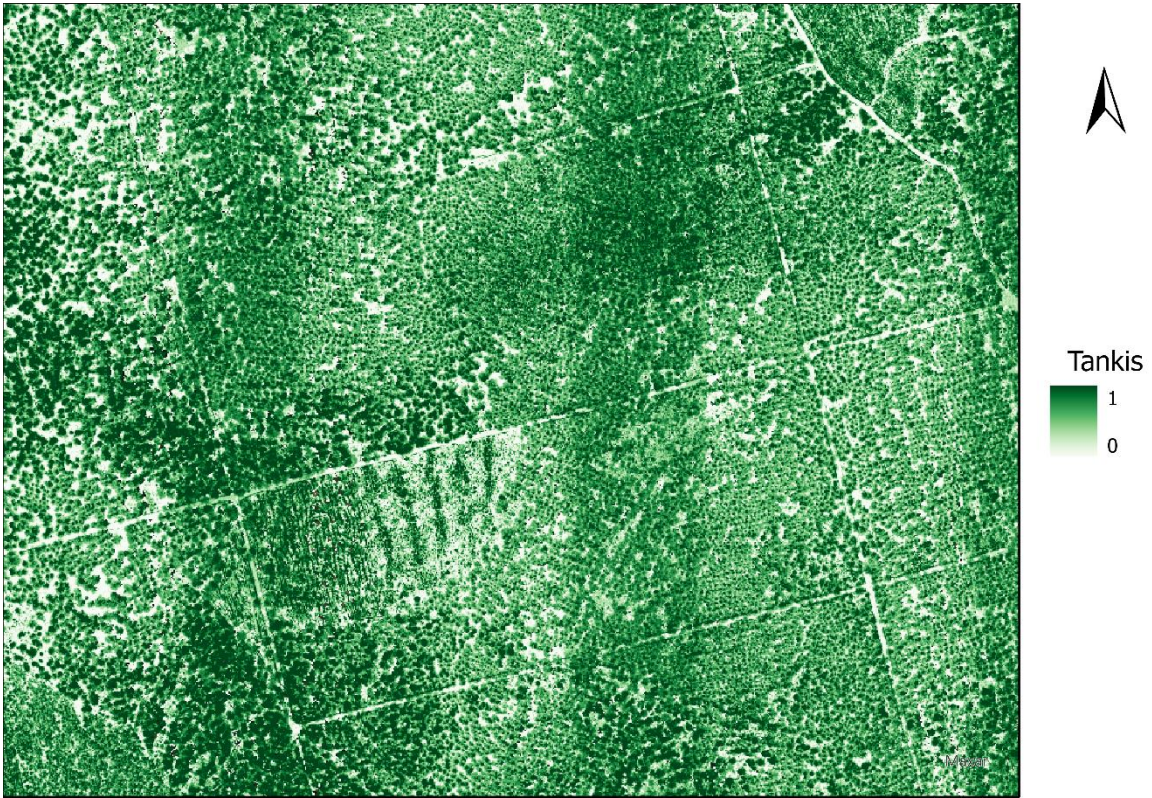


14 pav. Skaitmeninis paviršiaus modelis (Nr. 3)

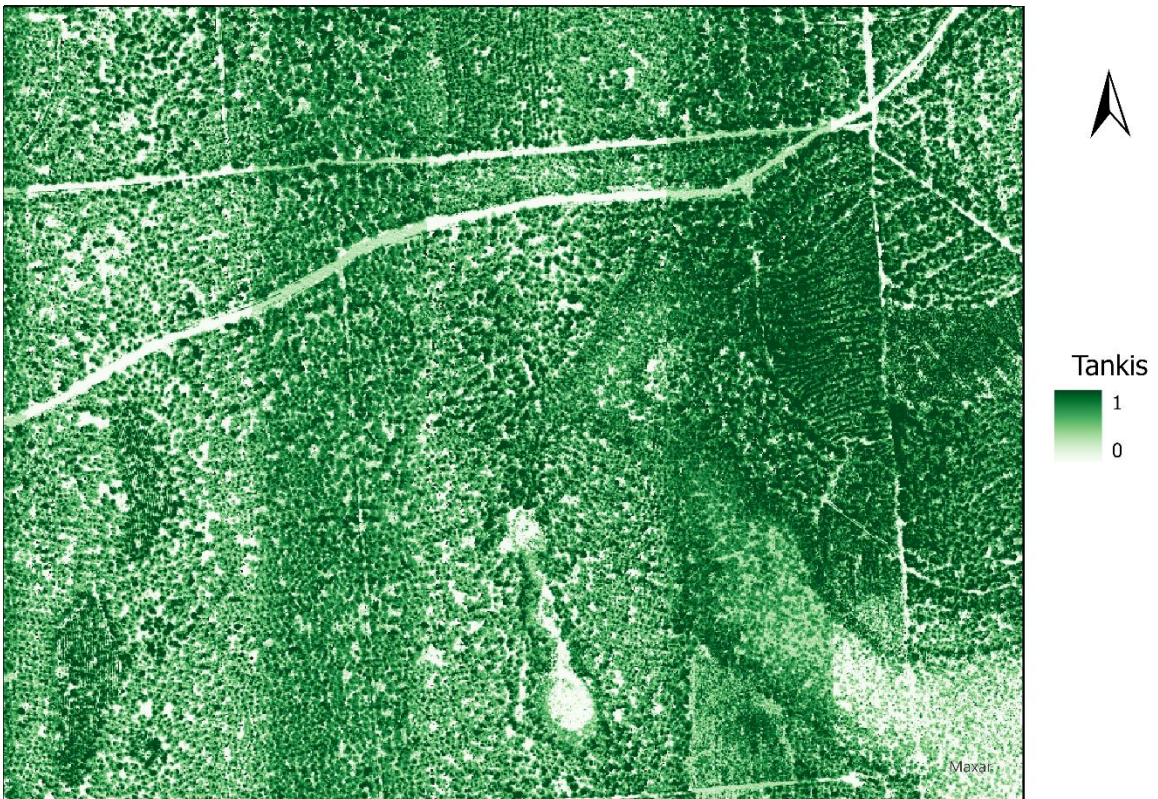


15 pav. Skaitmeninis reljefo modelis (Nr. 3)

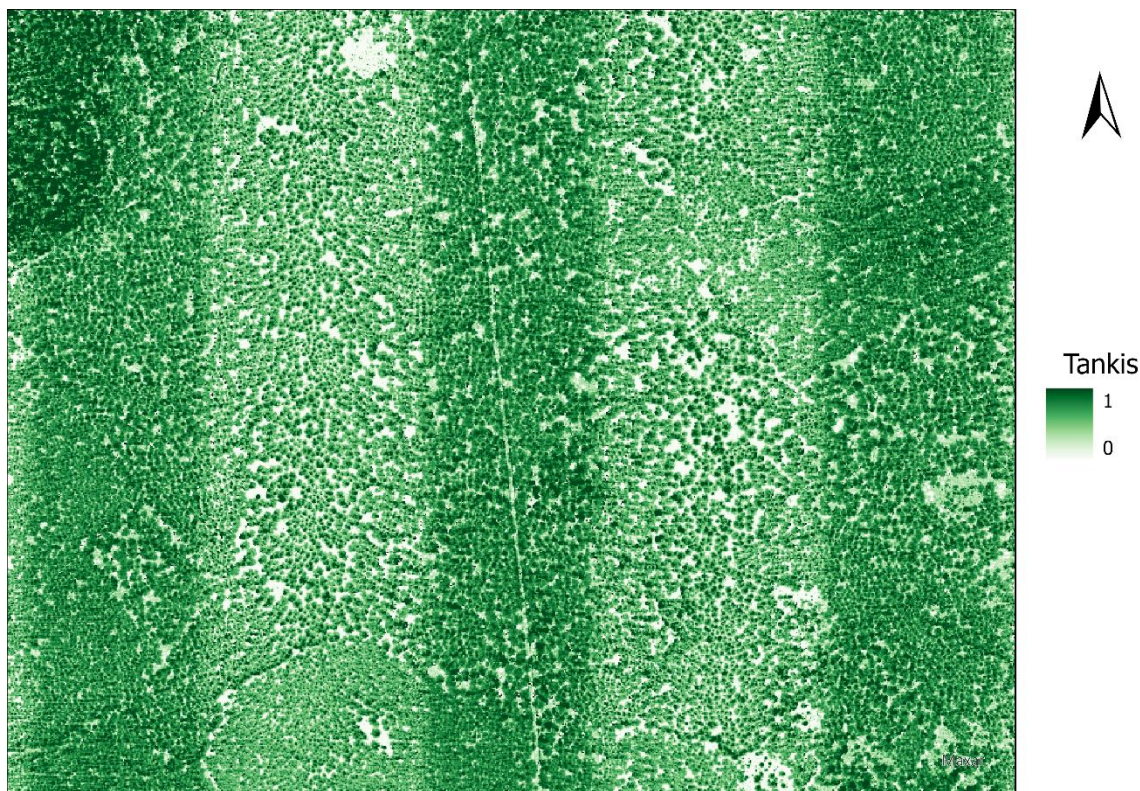
Sekančiame tyrimo etape analizuojamos miško plotų medžių lajos tankio ir aukščio charakteristikos. Kadangi, kaip ir minėta tyrimo metodikoje, darbo eiga yra nuosekli, šioje dalyje panaudoti rezultatai, kurie buvo gauti ankstesnėje darbo dalyje. Pirmiausia sugeneruoti miško ploto medžių lajos tankio skaitmeniniai modeliai. Ši dalis yra viena sudėtingesnių tyrimo metodikoje, kadangi apima eilę erdvinės analizės įrankių, juos derinant tarpusavyje. Miško medžių lajos tankio skaitmeninių modelių kūrimas yra paremtas rastrinių vaizdų funkcijomis ir savybėmis. Toks metodas pasirinktas dėl pačių rastrinių vaizdų lankstumo manipuliacijoms, aritmetinėms funkcijoms bei perklasifikavimui pagal poreikį. Pagal metodiką sugeneruota rastrinių vaizdų pora iš esmės atspindi skaitmeninius teritorijos paviršiaus ir reljefo modelius, tačiau jų funkcija čia visai kitokia. Šioje vietoje, kaip ir minėta ankstesnėje dalyje, labai didelį vaidmenį atlieka taškų skaičius ir tankis tam tikrose analizuojamos teritorijos dalyje. Kadangi yra naudojami dviejų skirtingų klasifikacijų ir dviejų skirtingų grąžų LiDAR taškai, jau tarpiniuose skaitmeninių modelių generavimo etapuose galima išskirti tam tikrus metodo trūkumus. Pavyzdžiui, vietose, kuriose taškų tankis yra itin mažas arba taškų yra labai mažai, rezultatus stipriai įtakoja interpoliacijos svoris. Todėl skaitmeninis medžių lajos tankio modelis ne visada gali būti tikslus – tai priklauso nuo paties duomenų rinkinio, duomenų surinkimo metodo, techninės ir programinės įrangos bei duomenų apdorojimo. Kaip žinoma, kuo mažesniame aukštyje yra atliekamas lazerinis teritorijos skenavimas, tuo taškų debesis bus tankesnis ir detalesnis. Tuo tarpu, didėjant aukščiui iš kurio atliekamas skenavimas, taškų debesies tankis mažėja. Atsižvelgiant į darbe naudoto duomenų rinkinio specifiką, t. y. faktą, kad duomenys buvo rinkti nacionaliniu lygmeniu iš gana didelio aukščio, šios dalies rezultatai vertinami atsargiai. Sugeneravus pirminius rastrinius vaizdus iš LiDAR taškų debesies, iš pirmo žvilgsnio jokių trūkumų pastebėti negalima. Todėl, toliau apdorotas rastrinis vaizdas, eliminuojant iš jo tuščias reikšmes bei jas perklasifikuojant, taip pat apdorojant taškų debesį taip, kad jis būtų atvaizduotas kaip taškų skaičiaus erdvėje išraiška, galima įvertinti detalesnes duomenų rinkinio charakteristikas ir išskirti teritorijas, kuriose generuojami rezultatai gali būti ne itin tikslūs ar nepatikimi. Ši tyrimo dalis apima tiek LiDAR taškų debesies klasifikaciją, tiek grąžas, tiek vidines duomenų rinkinio charakteristikas, todėl yra bene detaliausia ir sudėtingiausia analizės dalis visame darbe. Pagal aprašytą darbo metodiką atlikus LiDAR taškų debesies ir rastrinių vaizdų apdorojimą, sugeneruotas miško medžių lajos tankio rastrinis vaizdas. Tai taip pat yra 10 m rezoliucijos rastrinis vaizdas, simbolizuotas skirtingo intensyvumo žalia spalva, atitinkančią tankio reikšmes, šiuo atveju intervale 0-1: kur 0 – mažiausias tankis, 1 – didžiausias. Toliau, tokie skaitmeniniai miško medžių lajos tankio modeliai sugeneruoti visoms trims analizuojamoms teritorijoms su vienoda vizualizacija bei reikšmių intervalais.



16 pav. Skaitmeninis miško ploto medžių lajos tankio modelis (Nr. 1)



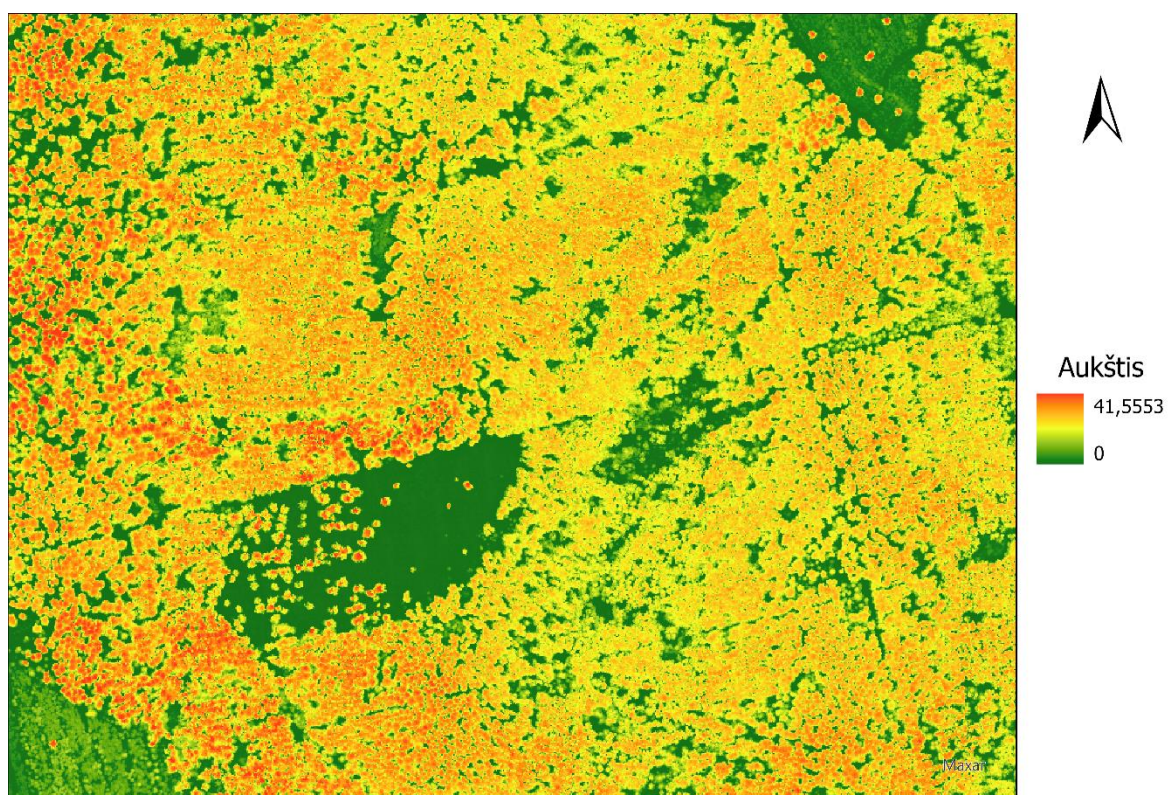
17 pav. Skaitmeninis miško ploto medžių lajos tankio modelis (Nr. 2)



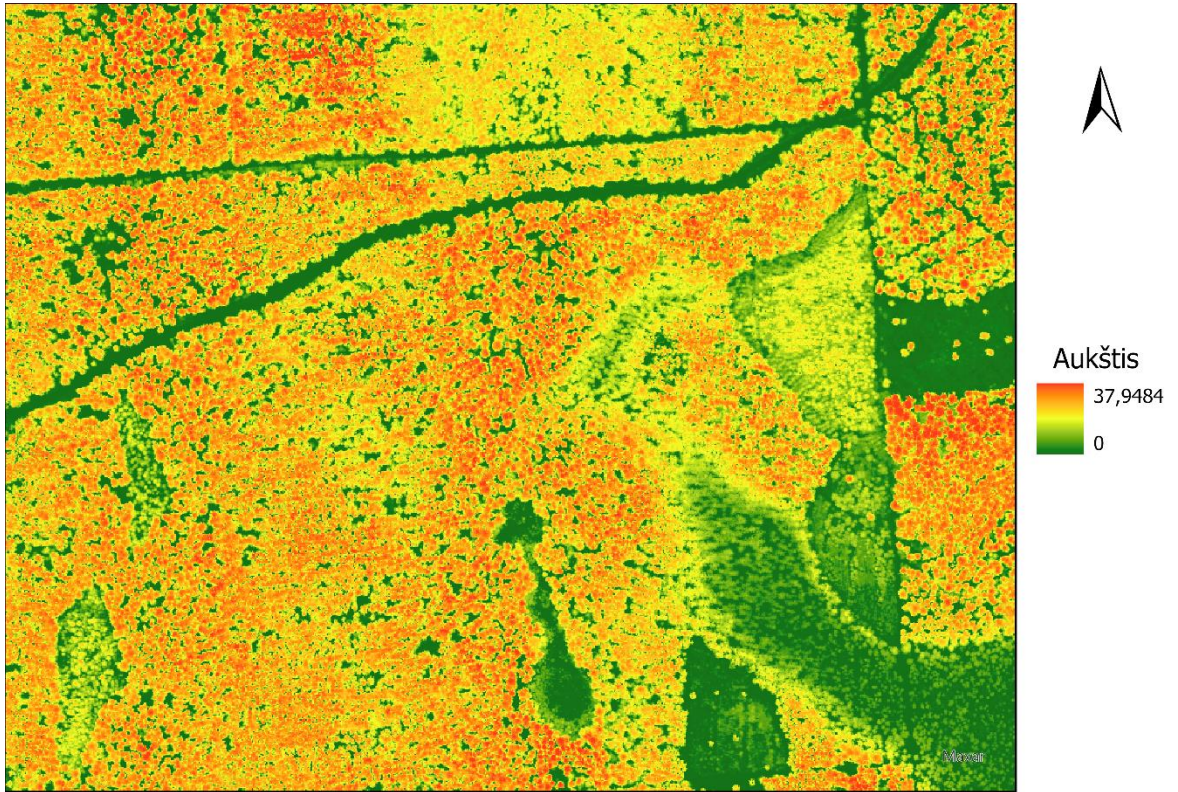
18 pav. Skaitmeninis miško ploto medžių lajos tankio modelis (Nr. 3)

Skaitmeniniai miško ploto medžių lajos tankio modeliai leidžia miškotyros specialistams nevykdant tradicinių lauko tyrimų įvertinti net keletą miškingos teritorijos charakteristikų iš karto, kadangi medžių lajos tankis nurodo ploto dalį, kurią dengia medžių laja ir yra išreiškiamas procentais nuo viso bendro ploto. Šios charakteristikos gali būti tokios kaip: miško būklės stebėseną laike ir erdvėje, medynų augimo tempai ir tendencijos, miško plotų fragmentacija, kirtaviečių valdymas ir stebėseną bei daug kitų. Tyrimo atveju, sugeneruoti skaitmeniniai medžių lajos tankio modeliai yra gana detalūs ir leidžia įvertinti miško būklę bendrame kontekste. Čia vis dėl to atsiranda tam tikrų apribojimų ir kliūčių, susijusių su pačiu duomenų rinkiniu. Kaip ir minėta anksčiau, tokiems skaitmeniniams modeliams generuoti yra reikalingas itin tankus LiDAR taškų debesis, ypač tose vietose, kuriose medžių lajos yra ne daug ar ji yra pakankamai reta. Taip pat, verta atkreipti dėmesį ir į trikdžius, atsiradusius duomenų surinkimo metu, kurie pasireiškia kaip tam tikri rėžiai ir simbolizuoja tankesnę medžių lają. Tuo tarpu, vietose, kuriose medžių lajos apskritai nėra arba ji tokia smulki bei reta, kad būtų užfiksuota lazerio spindulio, čia fragmentacija yra gana tiksli ir patikima. Visų trijų analizuotų teritorijų atveju galima išskirti tam tikras miško plotų zonas, kuriose medžių laja yra tankesnė, taip pat ir tam tikrus „tuščius“ plotus, kuriose jos nėra arba ji labai reta. Miško ploto medžių lajos tankio modelis taip pat gali pasitarnauti ir klasifikuojant tam tikras medynų rūšis, tačiau tam reikalingas itin detalus LiDAR duomenų rinkinys ir papildoma skaitmeninio modelio analizė.

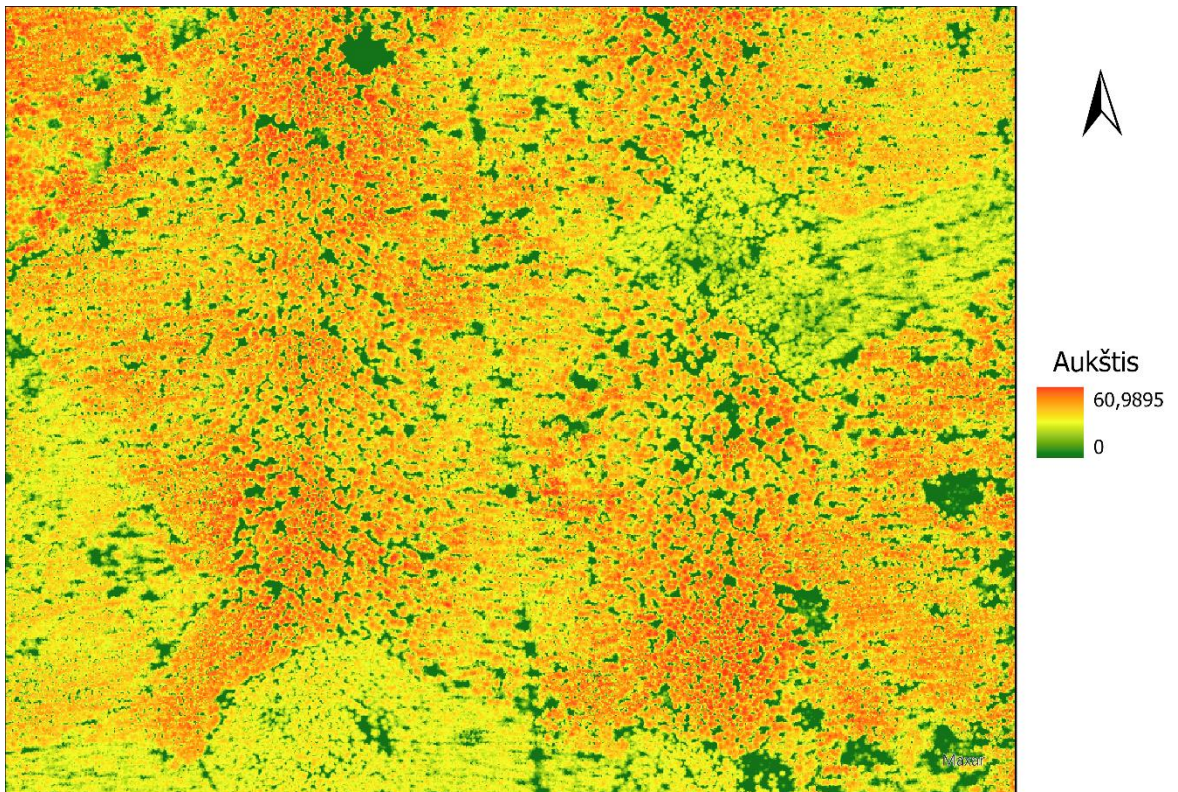
Toliau, pagal aprašytą darbo metodiką, iš skaitmeninio paviršiaus modelio atėmus skaitmeninį reljefo modelį, sugeneruoti visų trijų teritorinių vienetų skaitmeniniai medžių lajos aukščio modeliai. Tokie rastriniai vaizdai jau dabar yra plačiai paplitę tarp užsienio miškotyros specialistų ir dažnai naudojami kaip etaloniniai arba pamatiniai įvairių miškų plotų analizei. Šiuo metu, esant dideliame duomenų prieinamumui, tam tikros institucijos net yra parengusios gana detalius pasaulinius miškų medžių lajos aukščio modelius. Bet kokiu atveju, analizuojant dominančius teritorinius vienetus, šis skaitmeninis modelis yra vienas iš pagrindinių, norint įvertinti miškų būklę. Miško medžių lajos aukštis yra įtakojamas tiek pačių medynų rūšių, tiek pačios miško būklės ir jo augimo sąlygų. Būtent todėl, skaitmeniniai miškų medžių lajos tankio ir aukščio modeliai gali būti panaudoti kartu, vertinant miško būklę kompleksiskai. Daugeliu atvejų, koreliacija tarp medžių lajos tankio ir reljefo aukščio dažnai būna gana tolygi, aiški ir tendencinga. Tai reiškia, kad vietose, kuriose medžių lajos tankis yra gana didelis, reljefo aukštis taip pat dažniausiai pastebimas aukštesnis. Taip būna ne visada, kadangi medžių lajos aukštį gali įtakoti ir skirtingos medžių rūšys bei kiti veiksniai, todėl pilnai remtis tokia koreliacija nerekomenduojama. Žemiau pateikiami visų trijų teritorinių vienetų sugeneruoti skaitmeniniai miško medžių lajos aukščio modeliai. Kaip įprasta, tai – 10 m rezoliucijos rastriniai vaizdai, šiuo atveju simbolizuoti žalioje-geltonoje-raudonoje skalėje su atitinkamomis aukščio reikšmėmis. Šie skaitmeniniai modeliai nuosekliai panaudoti ir sekančiame darbo etape. (Esri, 2019)



19 pav. Skaitmeninis miško ploto medžių lajos aukščio modelis (Nr. 1)



20 pav. Skaitmeninis miško ploto medžių lajos aukščio modelis (Nr. 2)



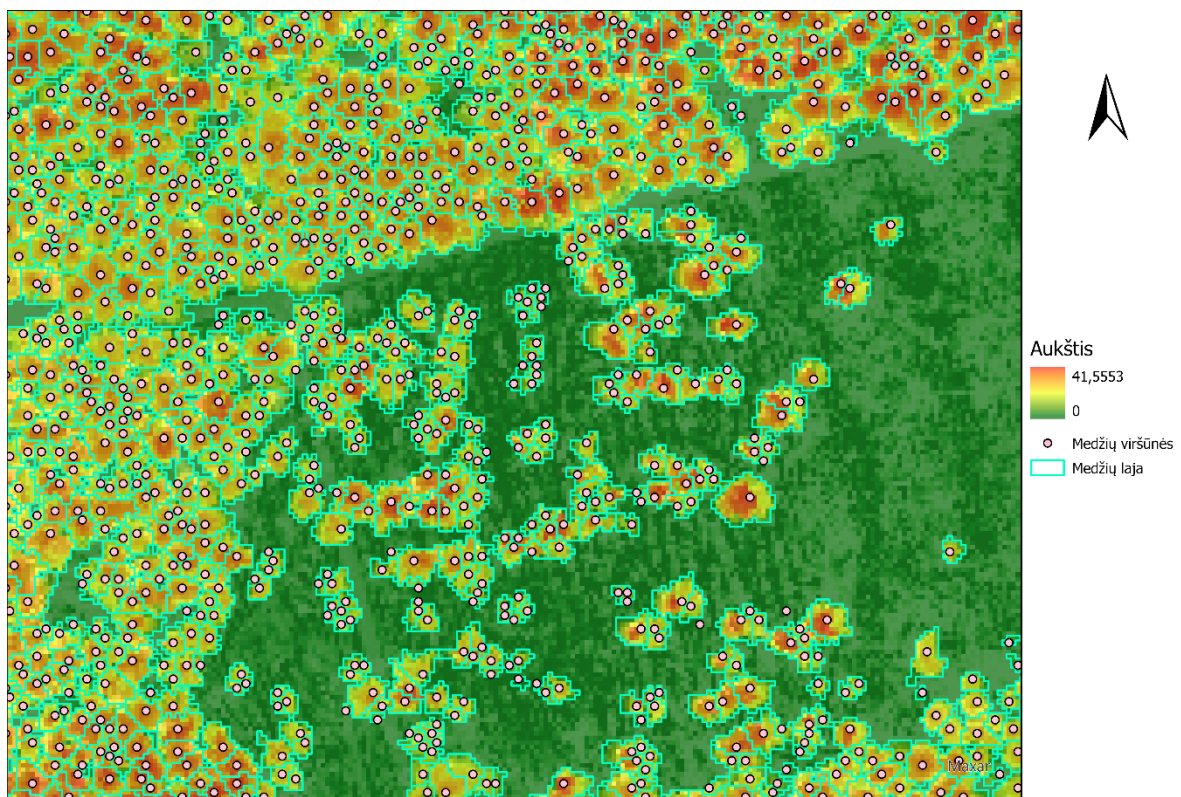
21 pav. Skaitmeninis miško ploto medžių lajos aukščio modelis (Nr. 3)

Paskutinis miško ploto analizės etapas, panaudojant LiDAR duomenis apima ArcGIS Pro programinės įrangos išplėtimą R programavimo kalbos kodu. Kaip jau minėta keletą kartų, darbo metodika yra nuosekli, todėl šiame etape taip pat panaudoti praeitos dalies produktai, tiksliau – skaitmeniniai medžių lajos aukščio modeliai (angl. *CHM*). R šaltinio kodas, paremtas „*ForestTools*“ paketu įgyvendina vadinamo kintamo lango filtro (angl. *vwf*) algoritmą, kuris sukuria savaimę „judantį“ langą arba poligoną, nuskaitantį medžių lajos aukščius ir, jei nustatoma, kad tam tikra rastrinio vaizdo ląstelė yra aukščiausia tame kintančiame lange, ji pažymima kaip medžio viršūnė. Šio dydžio langas yra pritaikytas konkrečiai analizuojamos teritorijos vietai ir medžių lajos dydžiui atitinkamoje vietoje. Paprastai, ažuolai turi labiau išreikštą medžių lają nei šiaurinės kietmedžių rūšys, o subrendę medžiai turi didesnę medžių lają nei nesubrendę medžiai. Numatytame šaltinio kode panaudota funkcija, kuri gali nustatyti paieškos lango dydį, pagal formulę ($lin <- function(x)\{x * .05 + 3.5\}$): kur x reiškia medžio lajos aukštį virš žemės paviršiaus toje vietoje. Kintamasis x buvo modifikuotas tris kartus, siekiant rasti optimaliausią reikšmę. Panaudotos kintamojo reikšmės buvo: 0 m, $\frac{1}{2}$ atitinkamo skaitmeninio medžių lajos aukščio modelio vidutinio aukščio ir $\frac{1}{2}$ pusės atitinkamo skaitmeninio medžių lajos aukščio modelio vidutinio aukščio. Visi kintamojo variantai generavo panašius rezultatus, tačiau kaip optimaliausias išsiskyrė 0 m aukštis. Šio kintamojo reikšmės labai priklauso nuo atitinkamos teritorijos skaitmeninio medžių lajos aukščio modelio aukščių reikšmių, todėl turi būti parenkamas individualiai. Bet koku atveju, parinkus kintamojo reikšmę, jei ji patenka į analizuojamo skaitmeninio modelio reikšmių intervalus, beveik visais atvejais rezultatai generuojami gana panašūs. Šios darbo dalies rezultatas yra tiek individualus programinės įrangos „*geoprocessing*“ įrankis medžių lajos ir medžių viršūnių analizei, tiek erdviniai taškinis ir poligonų sluoksnis, simbolizuojantis medžių lajos išsidėstymą erdvėje bei individualių medžių viršūnes. Be to, minėtų erdvinio taškinio ir poligonų sluoksnių atributinės lentelės yra užpildomos papildomais statistiniais rodikliais, kurie gali būti aktualūs verifikuojant rezultatus arba analizuojant tiek pavienius miškų plotus, tiek pavienius individualius medžius. Šie atributai yra: medžių lajos aukštis (m), medžių lajos spindulys (m), medžių lajos skersmuo (m) ir medžių lajos užimamas plotas (m²). Šie rodikliai, kartu su erdviniais sluoksniais ir skaitmeniniais medžių lajos aukščio modeliais gali padėti įvertinti ne tik miško būklę, tačiau ir būti panaudoti kaip pagalbiniai duomenys klasifikuojant miškų plotus pagal amžių, medynų rūšis ir funkcines zonas. Taip pat, iš anksto žinant medynų amžių arba rūšis, galima įvertinti ir kitas individualaus miško ploto charakteristikas. Žemiau pateikiama lentelė (**5 lent.**) su visų trijų analizuojamų teritorijų skaitmeninių medžių lajos aukščio modelių pagalba sugeneruotų erdvinio taškinio ir poligonų sluoksnių vidutiniais statistiniais rodikliais. (SRBC, 2022)

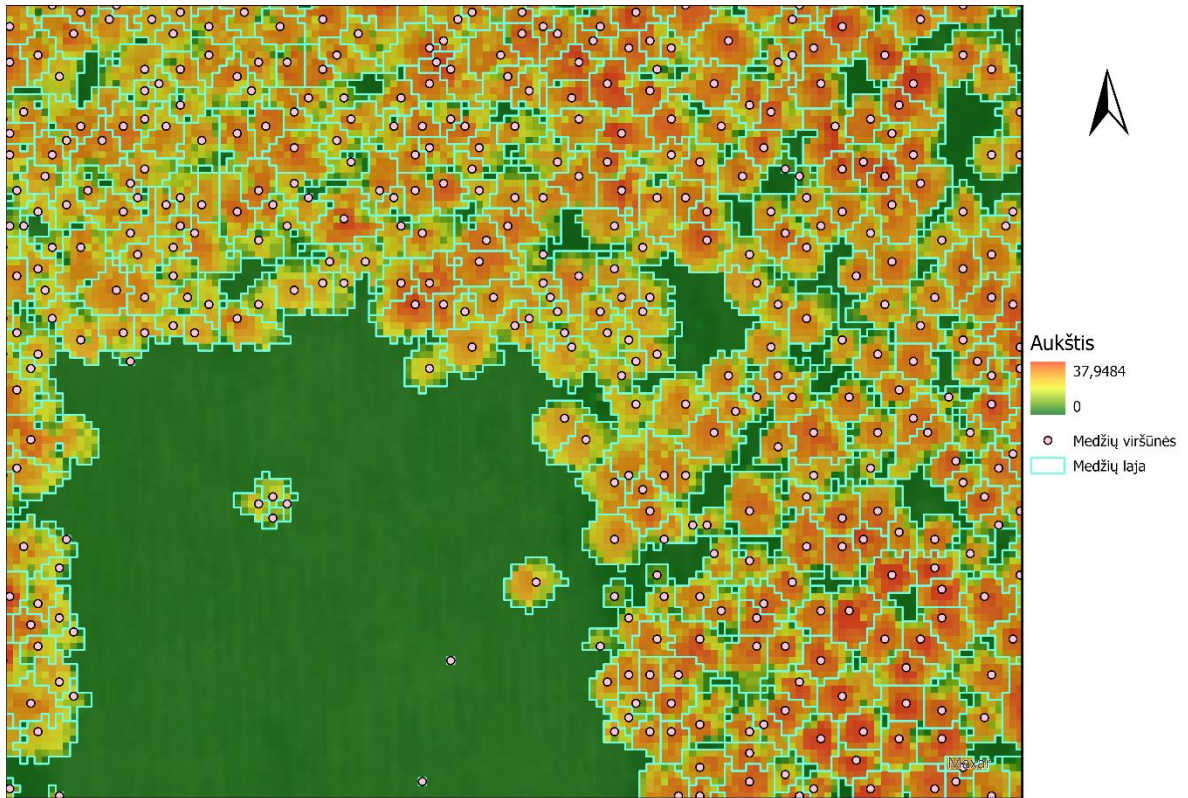
5 lent. Vidutinės teritorijų medžių lajos statistinės reikšmės

Teritorijos Nr.	Aukštis, m	Spindulys, m	Skersmuo, m	Plotas, m ²
1	20,10	1,60	5,00	21,10
2	21,10	1,66	5,10	21,60
3	20,70	1,64	5,10	21,30

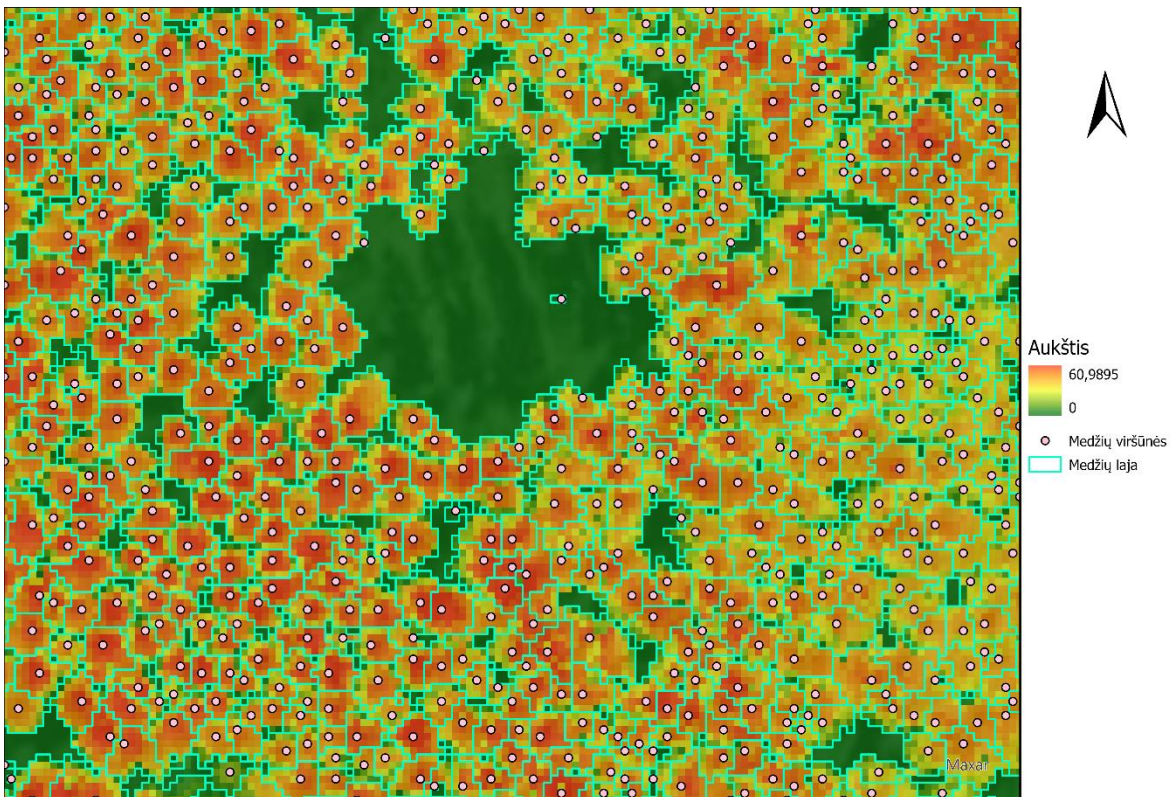
Žemiau pateikiamos visų trijų analizuojamų teritorijų erdvinių vektorinių taškų ir poligonų sluoksnių kartoschemos, kartu perdengtos su sumažinto ryškumo skaitmeninio medžių lajos aukščio modeliais. Kadangi šie erdviniai sluoksniai yra skaitmeninių modelių produktai arba išvestys, perdengiant juos tarpusavyje galima verifikuoti gaunamus rezultatus, panaudojus R programavimo kalbą, kuriant individualų „*geoprocessing*“ įrankį. Pažvelgus į kartoschemas, galima pastebėti, kad visų teritorijų atveju generuojami rezultatai atrodo ganėtinai tikslūs. Žvelgiant į poligonų vektorius, čia matomas sąryšis tarp jų ploto ir medžių lajos aukščio. Tuo tarpu, medžių viršūnių taškai gana patikimai identifikuoja tiek pavienius medžius, tiek tankius medynus. Pateikiamose kartoschemose analizuojamų teritorijų plotai parinkti kuo labiau fragmentuoti tam, kad būtų galima įvertinti skirtingo tankio medžių lajos ir medžių viršūnių identifikavimo tikslumą. (SRBC, 2022)



22 pav. Miško ploto medžių lajos ir pavienių medžių vektoriniai duomenys (Nr. 1)



23 pav. Miško ploto medžių lajos ir pavienių medžių vektoriniai duomenys (Nr. 2)



24 pav. Miško ploto medžių lajos ir pavienių medžių vektoriniai duomenys (Nr. 3)

3.2. LiDAR duomenų pagrindu sukurto vertinimo modelio verifikavimas

Darbo metodika paremti ir sugeneruoti rezultatai visoms trimis analizuojamoms teritorijoms susideda iš: trijų skaitmeninių paviršiaus modelių, trijų skaitmeninių reljefo modelių, trijų skaitmeninių medžių lajos tankio modelių, trijų skaitmeninių medžių lajos aukščio modelių, ir šešių vektorinių erdviųjų duomenų sluoksnių (trys taškų ir trys poligonų). Toks didelis kiekis rezultatų, t. y. rastrinių vaizdų ir vektorinių erdviųjų duomenų sluoksnių sukurtas dėl keleto priežasčių: a) tyrimo metodikos verifikavimo; b) teritorijų tarpusavio palyginimo; c) naudotų įrankių parametru optimizavimo. Pirmiausia, pati tyrimo metodika daugiau ar mažiau atitinka daugelio užsienio literatūroje pateiktų sprendimų. Kadangi darbo metodinė dalis buvo rengiama individualiai, integruojant skirtingus šaltinius ir pavyzdžius, tam tikrų skirtumų nuo kitų tyrimų pavyzdžių čia pastebėti galima. Bet kokiu atveju, žvelgiant į rezultatus, galima teigti, kad tyrimo metodika veikia ir generuoja pradžioje numatytus rezultatus bei sprendžia išsikeltus uždavinius. Kiek tie rezultatai yra patikimi, priklauso nuo galimybės juos palyginti ir verifikuoti su panašių tyrimų rezultatais ar kitais išoriniais šaltiniais. Antra, remiantis darbo metodika, kaip ir minėta, išskirtos trys teritorijos analizuojamoje bendroje teritorijoje (Labanoro-Pabradės girioje) su tikslu gautus rezultatus palyginti tarpusavyje vertinant darbo metodikos veikimą ją pritaikant skirtinguose teritoriniuose vienetuose. Šiuo atveju, tyrimo metodika yra labai priklausoma nuo duomenų rinkinio su kuriuo dirbama. Jei tyrimas yra vientisas ir nuoseklus, t. y. rezultatų siekiama pagal aprašytą metodiką, naudojant vienodą arba labai panašų duomenų rinkinį, tuomet rezultatai iš esmės generuojami panašaus patikimumo ir tikslumo. Turint omenyje, kad aprašyti miško ploto analizės metodai, bent jau atskirai, yra gana plačiai naudojami tarptautinėje bendruomenėje, su miškotyra susijusiuose tyrimuose ir uždavinių sprendimuose, iš esmės pagrindinę įtaką generuojamų rezultatų tikslumui ir validumui gali daryti tik duomenų rinkinio kokybė. Bet kokiu atveju, gaunamus rezultatus verifikuoti reikia, kadangi šis tyrimų metodas vis dar yra gana naujas. Atsižvelgiant į tai, kad panašaus pobūdžio tyrimų Lietuvoje atlikta beveik nebuvo, rezultatų verifikavimas turi apimti platesnį spektrą literatūros, informacinių šaltinių ir panašaus pobūdžio rezultatų. Kadangi teritorijos vertinimas yra komponentinis ir kompleksiškas, rezultatų verifikavimo metodai taip pat persipina tarpusavyje. Siekiant įvertinti LiDAR, kaip nuotolinių tyrimų metodo, galimybes miškotyroje, darbo metodika paremti generuojami rezultatai turi būti patikimi. Statistiniams rezultatams generuoti panaudotų duomenų rinkinių rodikliai jau aptarti ansktesniame skyriuje, tačiau patys sugeneruoti rezultatai – ne, arba labai siaurai. Todėl, būtų svarbu palyginti gautus rezultatus su išoriniais šaltiniais ir duomenų rinkiniais, jei tokių yra. (Dubayah..., 2020)

Teritorijų palyginimas tarpusavyje jau aptartas atitinkamų darbo dalių skyriuose ten, kur juos palyginti būtų logiška ir priimtina. Pavyzdžiui, skaitmeninių paviršiaus modelių ir skaitmeninių reljefo modelių lyginimas tarpusavyje, skaitmeninių miško medžių lajos tankio ir skaitmeninių miško medžių lajos aukščio modelių lyginimas tarpusavyje, taip pat erdvinių vektorinių sluoksnių, simbolizuojančių miško ploto užimamos medžių lajos plotą ir pavienių medžių viršūnes lyginimas su skaitmeniniais miško medžių lajos aukščio modeliais. Šiuose palyginimuose iš esmės jokių trūkumų pastebėta nebuvo, o jei jie būtų pastebėti, tai sufleruotų apie netinkamą erdvinės analizės modelio veikimą arba pavienių įrankių parametrus, kurie galėtų būti nesunkiai koreguojami. Kadangi tyrimo atveju dirbama su trimačiais duomenimis, o panašių tyrimų, kaip buvo minėta literatūros apžvalgos skyriuje, Lietuvoje atlikta beveik nebuvo, realių išorinių rezultatų, ypač atitinkančių tas pačias analizuojamas teritorijas palyginti su darbo rezultatais nepavyko. Vis dėl to, tam tikram rezultatų verifikavimui erdvinės analizės modelį galima išskaidyti į dalis, pagal kurias darbo metodika ir buvo parengta. Pirmiausia, vertinant skaitmeninių miško ploto paviršiaus ir reljefo modelių validumą, galima pasitelkti kitų institucijų parengtus ir publikuotus modelius. Šiam palyginimui pasitelktas UAB „Hnit-Baltic“ viešai prieinamas skaitmeninis 10 m rezoliucijos visos Lietuvos reljefo modelis. Šis reljefo modelis pagal metaduomenis buvo kuriamas kombinuojant keletą duomenų šaltinių, įskaitant ir LiDAR duomenis, tačiau ne pačius naujausius. Visų trijų skaitmeninių reljefo modelių verifikavimas atliktas iš visos Lietuvos modelio iškerpant minėtas teritorijas siekiant kuo labiau sumažinti geometrijos paklaidas ir turėti tolygumą lyginant iš skirtingų šaltinių sugeneruotus rastrinius vaizdus. Natūralu, kad lyginant skaitmeninius reljefo modelius akcentuoti reikia aukščių reikšmes, t. y. mažiausią ir didžiausią. Atlikus verifikavimą, pastebėta, kad skirtumai tarp tyrimo metu sugeneruotų modelių ir anksčiau paskelbto rastrinio vaizdo varijuoja nuo 0,01 iki 0,1 m. Tokią paklaidą galima paaiškinti paprasčiausiais pačių rastrinių vaizdų geometrijos skirtumais, kurie atsiranda dėl programinės įrangos specifikos arba itin minimaliais pačios teritorijos reljefo pokyčiais, turint omenyje, kad šviežiai sugeneruotų ir su jais lyginamų modelių amžius skiriasi maždaug 4-5 metus. Bet kokiu atveju, skirtumai yra labai maži ir sugeneruoti rastriniai vaizdai pilnai atitinka realybę. Sudėtingesnė situacija yra verifikuojant skaitmeninius miško plotų paviršiaus modelius. Darbo metu sugeneruotus rezultatus galima būtų palyginti nebent su ne itin tikslu pasauliniu skaitmeniu paviršiaus modeliu, kadangi nacionaliniu mastu tokio produkto tiesiog nėra. Problema palyginimui čia kyla todėl, kad lyginant skirtingų metų ar net kelių mėnesių modelius viršutinė (aukščiausia) modelio reikšmė gali stipriai skirtis atitinkamoje teritorijoje. Taip atsitinka todėl, kad paviršiaus modelis apima tiek reljefą, tiek ant jo esančius objektus, įskaitant tiek gamtinius, tiek

antropogeninius. Šiuo atveju, tam tikri objektai arba tiesiog ūgtelėję medžiai gali iškraipyti viršutinę modelio reikšmę ir sufleruoti apie neteisingus rezultatus, nors realybėje taip nėra. Vis dėl to, labai panašiai kaip ir su skaitmeniniais reljefo modeliais, aukščius čia galima verifikuoti taip pat, tik ne aukščiausius ir žemiausius, o tik žemiausius, t. y. žemės taškus. Tyrimo metu sugeneruoti skaitmeniniai paviršiaus modeliai nuo palyginimui pasirinkto nacionaliniu mastu sugeneruoto skaitmeninio reljefo modelio, panašiai kaip ir reljefo modelių atveju per daug nesiskiria. Čia aukščių variacija yra šiek tiek didesnė ir vyrauja intervale nuo 0,01 iki 0,3 m. Tokius skirtumus gali įtakoti paties duomenų rinkinio struktūra ir kokybė. Verta atsižvelgti ir į tai, kad rezultatai verifikuojami lyginant skirtingo tipo reljefo modelius, todėl tokie nedideli iškraipymai nuteikia pozityviai ir patvirtina, kad darbo rezultatai yra validūs. (Dubayah..., 2020)

Sekantis etapas yra įvertinti ir skaitmeninius medžių lajos tankio bei aukščio modelius. Pirmiausia, vertėtų atsižvelgti į vieną iš sudėtingesnių modelių, t. y. medžių lajos tankio modelį. Kadangi ši darbo dalis reikalavo daugiausiai duomenų ir rastrinių vaizdų apdorojimo resursų, čia svarbu įvertinti pačius modelius kiek atidžiau. Analizuojamos teritorijos atveju, bene vienintelis rezultatų verifikavimo šaltinis čia gali būti palydovinės nuotraukos, kadangi realių, panašaus tipo modelių, patenkančių į šią teritoriją nėra. Šis verifikavimo procesas reikalauja nemažai rankinio darbo, o automatizuotas gali būti nebent pažangesnių giliojo mokymosi sprendimų pagalba. Naudojant „swipe“ sluoksnių valdymo vizualizacijos įrankį, kiekvienos iš trijų teritorijų minėti skaitmeniniai modeliai perdengti su aktualiomis palydovinėmis nuotraukomis – pageidautina vasaros metu ir su kuo mažiau debesuotumo. Rankiniu būdu analizuojant sąryši tarp realaus vaizdo iš palydovo ir sugeneruotų skaitmeninių modelių, galima nesunkiai identifikuoti sritis, kuriose skaitmeninis medžių lajos tankio modelis gali būti netikslus. Toks pavyzdys galėtų būti teritorijos dalis, kuri skaitmeniniame modelyje identifikuojama kaip didesnio nei vidutinio medžių lajos tankio, tačiau palydovinėje nuotraukoje, ji akivaizdžiai yra gerokai retesne, arba vegetacija yra labai fragmentuota. Šiu atveju, identifikavus tokias teritorijas ant palydovinių vaizdų yra braižomi poligonai (netikslų vietų). Galutinis rezultatas – kiekvienos analizuojamos teritorijos papildomas poligonų sluoksnis jų plotų sumomis. Šios sumos proporcingai yra palyginamos su visų analizuojamų plotų sumomis, čia išvestis – procentinis skaitmeninio medžių lajos tankio modelio patikimumas. Tyrimo atveju, pirmosios (Nr. 1) teritorijos skaitmeninio medžių lajos tankio modelio tikslumas – 89 %, antrosios (Nr. 2) – 91 %, o trečiosios – 93 %. Kaip galima matyti, paklaidos čia yra gerokai didesnės nei ankstesnių generuotų skaitmeninių modelių, tačiau nedrastiškai. Maksimalus 11 % netikslumas gali identifikuoti apie problemas pačiame duomenų rinkinyje, taškų ir jų tankio trūkumą

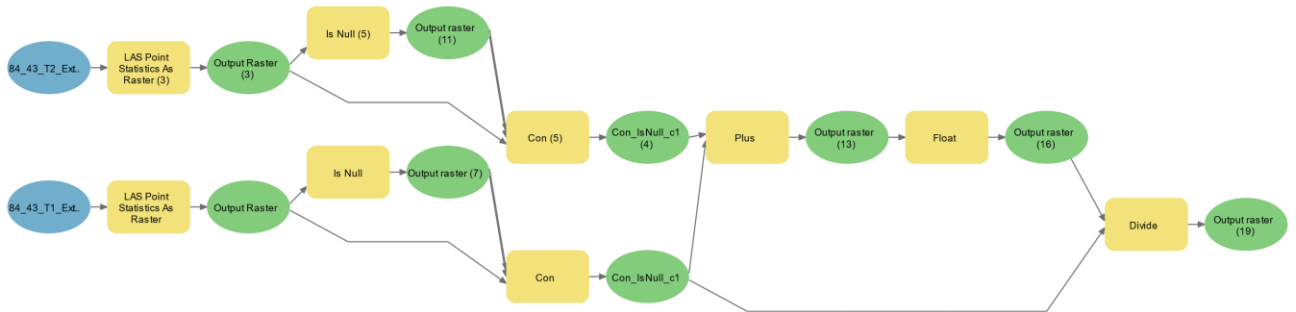
arba per didelę interpoliacijos svorį generuojant patį modelį. Šio darbo atveju, intensyvesnis duomenų arba pačių skaitmeninių modelių tikslinimas nėra būtinas, kadangi medžių lajos tankio vertinimas yra iš dalies papildomas ir erdviniais vektoriniais poligonų duomenimis, kurie gali būti panaudoti tiek rezultatų verifikavimui, tiek komponentiniam medžių lajos tankio vertinimui. Kadangi skaitmeniniai medžių lajos aukščio modeliai yra skaitmeninių miško ploto paviršiaus ir reljefo modelių išvestis, čia papildomas verifikavimas nereikalingas, kadangi įvestis verifikuota lyginant rastrinių vaizdų aukščius su išoriniais šaltiniais ankstesnėje dalyje. (Peng..., 2020)

Paskutinė darbo dalis, apimanti pavienių medžių inventoriaus ir savybių vertinimą yra vienodai svarbi tiek paties tyrimo vientisumui, tiek prieš tai sugeneruotų rezultatų verifikavimui bei teritorijos kompleksiniam vertinimui. Sugeneruoti erdviniai vektoriniai duomenų sluoksniai (taškų ir poligonų) taip pat iš dalies yra anksčiau sugeneruotų rezultatų produktai. Čia labiausiai tinkamas palyginimui yra skaitmeninis miško ploto medžių lajos aukščio modelis. Tam tikras šių erdvinų vektorinių duomenų sluoksnių palyginimas su skaitmeniniu medžių lajos aukščio modeliu atliktas jau ankstesniame skyriuje, taip pat jų perdengimas pateiktas ir trimis kartoschemomis (**22, 23, 24 pav.**). Atlikus tokį palyginimą, R programinio kodo generuojamų rezultatų tikslumas vertinamas kaip itin didelis, kadangi nei neidentifikuotos pavienės, nei per daug išplėtos tankesnės medžių lajos neteisingų klasifikavimų nepastebėta. Tas pats galioja ir su medžių viršūnėmis, kurios, kaip ir minėta, yra identifikuojamos pagal aukščiausius skaitmeninio modelio taškus. Kadangi jau nuspręsta, kad papildomo verifikavimo skaitmeninis medžių lajos aukščio modelis nereikalauja, šiuos taškinius erdvinis duomenis taip pat galima vertinti palankiai. Bet kokių atveju, reikia suprasti, kad ne visų medžių viršūnės čia yra identifikuojamos, o šių rezultatų tikslumas itin priklauso nuo pačios medžių lajos tankio atitinkamoje vietoje. Tokia koreliacija pasireiškia per mažėjančią pavienių medžių viršūnių identifikavimo tikslumą didėjant medžių lajos tankiui, kadangi gali atsirasti medynų, kurie slepiasi po kitais, aukštesniais medynais, jie įrankio nėra identifikuojami kaip viršūnės. Papildomam erdvinų vektorinių poligonų sluoksnių (medžių lajos ploto) verifikavimui pasitelkti Valstybinės miškų tarnybos miškų sklypų su atributais duomenys, kuriuose galima rasti medžių lajos aukščio rodiklius. Šiam rezultatų verifikavimo etapui pasirinktos visų trijų teritorijų vidutinės medžių lajos aukščio reikšmės tiek sugeneruotiems rezultatams, tiek miškų tarnybos duomenims. Rezultate, medžių lajos aukščio atveju, lyginant su VMT duomenimis, reikšmių skirtumai varijuoja nuo 0,6 iki 1,2 m intervale - tokie skirtumai gali atsirasti dėl skirtingų vertinimo metodų, duomenų ir programinės įrangos charakteristikų. Bet kokių atveju, paklaidų intervalai yra sąlyginai minimalūs, todėl sugeneruotus rezultatus galima verifikuoti. (Peng..., 2020)

Kaip jau minėta ankstesnėse darbo dalyse, šio darbo metodika parengta taip, kad ji būtų nuosekli. Tiek tyrimo metodikos, tiek miškų plotų analizės skyriuose galima pastebėti, kad kiekvienas etapas iš esmės veda prie sekančio etapo, kuris savaime veda prie dar sekančio ir t. t. Šiuo atveju, pati tyrimo metodika yra suformuota kaip erdvinės analizės modelis, kuris gali būti automatizuotas ir paruoštas kaip produktas naudojimui. Pati modelio idėja yra tokia, kad jo pritaikomumas turėtų būti įmanomas su bet koku, tyrimo pobūdį atitinkančiu, LiDAR duomenų rinkiniu ir generuoti panašius rezultatus visoje Lietuvos teritorijoje. Šiais laikais tokių rezultatų generavimo automatizavimo būdų yra gausu ir jie varijuoja nuo įvairių programavimo kalbų (*R*, *Python*), iki tam tikrų specifinių ir netradicinių sprendimų. Taip pat, verta paminėti, kad šio tyrimo modelio išplėtimas taip pat galimas ir pasitelkiant giliojo mokymosi sprendimus. Gilusis mokymasis yra platesnės mašininio mokymosi metodų, pagrįstų dirbtiniais neuroniniais tinklais su reprezentaciniu mokymusi, šeimos dalis ir gali būti prižiūrimas (angl. *supervised*), pusiau prižiūrimas (angl. *semi-supervised*) arba be priežiūros (angl. *unsupervised*). Toks sprendimas gali būti įgyvendinamas norint turėti pastovius, patikimus ir verifikuotus duomenis, naudojant tuos pačius trimačius LiDAR taškus, tačiau tam reikalingas nuolat atsinaujinantis duomenų šaltinis, todėl šis sprendimas gali būti labai brangus. Išplėtus modelio galimybes giliojo mokymosi principais, jis gali būti nuolat „apmokomas“, todėl rezultatų tikslumas ir patikimumas gali būti progresyvus. Šio darbo atveju, tyrimo modelis tiek automatizavimo, tiek pačios koncepcijos tikslais yra sukurtas naudojant ArcGIS Pro programinės įrangos „*ModelBuilder*“ sąsają. Tai iš esmės „*Python*“ programavimo kalba paremtas sprendimas, kuris nereikalauja pažengusiojo ar eksperto lygio minėtos kalbos programavimo žinių. Čia „*Python*“ programavimo kalba yra kaip pagrindas visam modelio veikimo principui, tačiau pats modelis yra išreikštas grafiškai. Kadangi šiam tyrimui sukurtas modelis apima tris skirtingas teritorijas ir nuoseklią veiksmų metodiką, jis yra ganėtinai didelis. Dėl šios priežasties žemiau pateikiamos atskiros pagrindinio modelio dalys. Pirmasis pateikiamas modelis (**25 pav.**) apima pirmąjį tyrimo etapą (miško ploto paviršiaus ir reljefo analizę), dalį antrojo tyrimo etapo (miško ploto medžių lajos aukščio analizę) bei trečiąjį etapą (miško ploto individualių medžių inventoriaus ir savybių analizę). Tuo tarpu, antrasis pateikiamas modelis (**26 pav.**) apima dalį antrojo tyrimo etapo (miško ploto medžių lajos tankio analizę). Visas, pilnos apimties modelis pateikiamas prieduose (**2 priedas**). Pats modelis iš esmės nėra itin kompleksiškas ir sudėtingas, tačiau sprendimas panaudoti „*ModelBuilder*“ sąsają priimtas dėl plačių automatizavimo ir modelio valdymo galimybių, kadangi jis yra gana lankstus pokyčiams ir patobulinimams, todėl gali būti pritaikomas pagal individualius poreikius. (Esri, 2011)



25 pav. Pirmoji miško ploto komponentinio vertinimo modelio dalis



26 pav. Antroji miško ploto komponentinio vertinimo modelio dalis

Pats modelis apibendrina ir vizualizuoja dar darbo metodikos skyriuje pateiktų įrankių ir aprašytų žingsnių veikimo principus. Šis ArcGIS Pro programinės įrangos sprendimas pasižymi itin dideliu lankstumu modelio optimizavimo, tobulinimo ir redagavimo atžvilgiu. Taip pat, modelis nėra labai jautrus ir įvesties/išvesties parametrų, tai reiškia, kad įvestis gali būti bet koks, svarbiausia tinkamo formato, LiDAR taškų debesis. Visais atvejais, jei į modelį kaip įvestis yra paduodami atitinkami pirmosios gražos ir žemės LiDAR duomenų rinkiniai, numatomi rezultatai modelio bus generuojami neišvengiamai. Šio darbo atveju pateikiamas modelis taip pat turi vietų, kurias galima dar tobulinti ir gerinti. Pavyzdžiui, sukuriant papildomą modelį ar jo dalį duomenų pirminiam apdorojimui (angl. *preprocessing*), kadangi pagrindė vienai teritorijai yra naudojami du skirtingų kategorijų ir klasifikacijų LiDAR duomenų rinkiniai. Šiuo atveju, specialistui užtektų į modelį paduoti tik pirminį, pilnos apimties LiDAR taškų debesį, o modelis visą darbą atliktų automatiškai. Tyrimo atveju, LiDAR duomenų rinkinio dalys kiekvienai teritorijai su atitinkamomis klasėmis ir klasifikacija buvo kuriamos rankiniu būdu ir paduodamos į modelį tiesiogiai. Antra, modelis galėtų būti praplėstas kintamaisiais, pavyzdžiui, išvesties pavadinimų. Tai reiškia, kad turint pastovų LiDAR duomenų šaltinį, duomenys būtų generuojami automatiškai ir archyvuojami su atitinkamų išvesties duomenų rinkinio pavadinimu, pvz. data ir laiku. Trečia, modelis galėtų turėti ne tik išvesties duomenų rinkinių pavadinimų kintamuosius, bet ir jame panaudotų įrankių parametrų parinkimo kintamuosius. Šiuo atveju, vartotojas modelį galėtų leisti keliomis iteracijomis, siekdamas tikrinti skirtingų parametrų poveikį rezultatams. Į modelį pridėjus parametrų kintamuosius, specialistui iš esmės reikėtų tik įvesti numatomus įrankių parametrus, jų intervalus, nepriklausomai nuo to ar tai skaitinė ar kitokio tipo reikšmė. Ketvirta, modelį galima paruošti pilnam naudojimui sudedant ant įvesties, išvesties ir įrankių parametrų nustatymus, taip leidžiant vartotojui modelį modifikuoti pagal savo poreikius interaktyviai, įprastu programinės įrangos būdu jau gerai pažįstamoje vartotojo sąsajoje. Šiuo atveju, pati modelio struktūra nebūtų keičiama, tačiau jo pritaikymas pagal individualius poreikius būtų gerokai supaprastintas procesas. Be šių patobulinimų, modelis taip pat gali būti nuolat atnaujinamas, žengiant koja kojon su naujausiomis technologijomis ir programinės įrangos atnaujinimais. Pakeitus vieną įrankį kitu, modelio iš naujo „statyti“ nereikia, todėl plataus spektro manipuliavimas čia yra realybė. Tyrimo atveju, atskiros modelio dalys buvo realiai panaudotos siekiant taupyti laiko kaštus ir šiek tiek automatizuoti procesą, kadangi darbe analizuotos trys teritorijos, o tris kartus kartoti tuos pačius veiksmus su skirtingais duomenų rinkiniais – neefektyvu. Galutinis modelio variantas kiek geriau optimizuotas ir pateikiamas tiek anksčiau nurodytose schemose, tiek prieduose. Pilnos apimties modelis buvo išbandytas ant „testinių“ duomenų rinkinių ir yra visiškai funkcionuojantis. (Esri, 2011)

IŠVADOS

- 1) Atlikta anksčiau vykdytų panašių tyrimų užsienyje ir Lietuvoje turinio analizė atskleidė, kad komponentinis miško ploto vertinimo modelis, paremtas LiDAR duomenimis, yra vienas patikimiausių nutolinių tyrimų metodų spręsti kompleksiškus miškotyros uždavinius.
- 2) Išskirtos trys pagrindinės miškų būklę įvardijančių komponentų grupės: miško ploto paviršius ir reljefas, miško ploto medžių lajos tankis ir aukštis bei pavienių medžių inventorius ir savybės. Kiekviena iš jų atskleidžia skirtingas miškų charakteristikas, tačiau komponentiniam miško ploto vertinimui reikalingas visų grupių integralumas.
- 3) Miškų būklę apibūdinančių komponentų analizės galimybė naudojant LiDAR duomenimis yra paremta LiDAR duomenų apdorojimu (filtravimas, klasifikavimas) ir rastrinių vaizdų generavimu iš jų. Priklausomai nuo taikomų tyrimo metodų, rastriniai vaizdai gali būti papildomai apdorojami, siekiant norimų rezultatų.
- 4) Tyrimui parinktas bendrasis miško plotas – Labanoro-Pabradės giria, o jos viduje, papildomai išskirtos trys vienodo dydžio mažesnės teritorijos. Trys skirtingos teritorijos bendrajame miško plote leidžia geriau įvertinti paties tyrimo modelio funkcionalumą ir generuojamų rezultatų patikimumą.
- 5) Atlikto miško ploto komponentinio vertinimo rezultatai pilnai atitinka numatytuosius, o darbo eigoje sugeneruoti rezultatai verifikuoti tarpusavyje bei remiantis išoriniais literatūros ir duomenų šaltiniais. Palyginimo su kitais šaltiniais metu reikšmingų skirtumų tarp rezultatų nepastebėta.
- 6) Parengtas miško ploto komponentinio vertinimo erdvinės analizės modelis sujungia aprašytą tyrimo metodiką į vieną visumą ir automatizuoja darbo procesą. Modelis yra pilnai funkcionuojantis ir sprendžia numatytuosius uždavinius.

SANTRAUKA

Ernestas Dicevičius

LiDAR duomenų taikymas miškotyroje (Labanoro-Pabradės girios pavyzdžiu)

Nuotoliniai tyrimai yra XXI a. sparčiai populiarėjanti žemės stebėjimo tyrimų sritis, kurios esmė yra fiziškai neprisiliečiant prie žemės paviršiaus rinkti duomenis apie įvairias jo savybes. Vienas iš tokių nuotolinių tyrimų metodų yra LiDAR (angl. *Light Detection and Ranging*). Kadangi LiDAR technologija leidžia iš karto įvertinti paviršiaus savybes jau trimatėje (3D) erdvėje, duomenų taikymo spektras yra gana platus ir vyrauja nuo gamtinių procesų stebėjimo ir analizės iki kasdienėje žmonių veikloje pritaikomų, iš pirmo žvilgsnio nesudėtingų, sprendimų. Šis darbas yra orientuotas į vieną iš gamtinių LiDAR technologijos taikymo sričių – miškotyra. Miškotyra - miškininkystės mokslo kryptis, nagrinėjanti miškų pagrindus, metodus, procedūras, priemones ir savybes, medžių ir medynų augimo sąlygas, miško sodinimo ir naudojimo būdus, miškų ūkio organizavimo procedūras. Šio darbo tikslas – įvertinti ir išanalizuoti LiDAR duomenų taikymo galimybes miškotyroje. Darbo tikslo įgyvendinimui suformuluoti šeši uždaviniai: atlikti anksčiau vykdytų panašių tyrimų užsienyje ir Lietuvoje turinio analizę; išskirti pagrindinius miškų būklę įvardijančius komponentus, taikomus miškotyroje; atlikti LiDAR duomenų taikymo galimybių analizę miškų būklę apibūdinančių komponentų išskyrimui; parinkti konkretų miško plotą, kuriame bus pritaikyti LiDAR duomenys miško būklės vertinimui ir apibūdinimui; atlikti konkretaus miško ploto komponentinį vertinimą, taikant LiDAR duomenis; verifikuoti LiDAR ir natūrinių tyrimų duomenis ir parengti taikymo metodiką. Tyrimo eiga yra paremta literatūros ir ankstesnių tyrimų tiek Lietuvoje, tiek užsienyje apžvalga, taip pat erdvinės analizės sprendimais. Išskirtos trys pagrindinės miško ploto vertinimo charakteristikos: miško paviršius, reljefas ir infrastruktūra, miško medžių lajos tankis ir aukštis, miško pavienių medžių inventorius ir savybės. Atlikus LiDAR duomenų taikymo galimybių miškotyroje vertinimą ir analizę nustatyta, kad komponentinis miško ploto vertinimo modelis, paremtas LiDAR duomenimis, yra vienas patikimiausių nuotolinių tyrimų metodų spręsti kompleksiškus miškotyros uždavinius. Atlikto miško ploto komponentinio vertinimo rezultatai pilnai atitinka numatytuosius, o parengtas miško ploto komponentinio vertinimo erdvinės analizės modelis sujungia aprašytą tyrimo metodiką į vieną visumą ir automatizuoja darbo procesą.

Reikšminiai žodžiai: nuotoliniai tyrimai, miškotyra, LiDAR, lazerinės sistemos.

SUMMARY

Ernestas Dicevičius

Application of LiDAR data in forestry (example of Labanoro-Pabradė forest)

Remote sensing is a rapidly growing field of earth observation research in the 21st century, the essence of which is to collect data on its various properties without physically touching the earth's surface. One such remote sensing method is LiDAR (Light Detection and Ranging). Because LiDAR technology allows the immediate evaluation of surface properties in three-dimensional (3D) space, the range of data applications is quite wide and ranges from the observation and analysis of natural processes to seemingly simple solutions applied in everyday human activities. This work is focused on one of the natural areas of application of LiDAR technology - forestry. Forestry is a field of forest sciences that examines the basics, methods, procedures, tools and properties of forests, the conditions for the growth of trees and stands, the methods of forest planting and use, and the procedures for organizing forestry. The aim of this work is to evaluate and analyze the application of LiDAR data in forestry. Six objectives have been formulated for the implementation of the aim of the work: to perform the analysis of the content of similar research conducted abroad and in Lithuania; to single out the main components of the state of forests used in forestry; to perform an analysis of the possibilities of applying LiDAR data for the isolation of components describing the condition of forests; to select a specific forest area where LiDAR data will be applied for the assessment and characterization of the forest condition; to perform a component assessment of a specific forest area using LiDAR data; to verify LiDAR and field research data and to develop application methodology. The course of the research is based on a review of the literature and previous research both in Lithuania and abroad, as well as on the solutions of spatial analysis. Three main characteristics of forest area assessment are distinguished: forest surface, relief and infrastructure, crown density and height of forest trees, inventory and characteristics of individual trees in the forest. The evaluation and analysis of the application of LiDAR data in forestry showed that the component forest area assessment model based on LiDAR data is one of the most reliable remote sensing methods to solve complex forestry problems. The results of the assessment of the forest area component fully comply with the defaults, and the model of the spatial analysis of the forest area component with the described research method into one whole and automates the work process.

Keywords: remote sensing, forestry, LiDAR, laser systems.

LITERATŪROS IR INFORMACINIŲ ŠALTINIŲ SĄRAŠAS

- Acroname. 2020. *Understanding LiDAR*. Boulder. [Prieiga per internetą](#).
- Arvidsson S., Gullstrand M. 2019. *Classifying natural forests using LiDAR data*. Jönköping.
- Bikuvienė I. 2012. *Miškų inventorizacijos teorinis ir praktinis tobulinimas, naudojant lazerinį skenavimą*. Akademija. /Daktaro disertacija/
- Donager J., Meador S. A. 2019. *Understanding LiDAR for Forest Applications*. Flagstaff.
- Dong P., Chen Q. 2018. *LiDAR Remote Sensing and Applications*. London.
- Dubayah O. R., Drake B. J. 2020. *LiDAR Remote Sensing for Forestry*. Columbia.
- Earth Lab. 2020. *What is LiDAR Data*. Boulder. [Prieiga per internetą](#).
- Esri. 2009. *LiDAR Solutions in ArcGIS: Estimating Forest Density and Height*. New York. [Prieiga per internetą](#).
- Esri. 2011. *LiDAR Analysis in ArcGIS 10 for Forestry Applications*. New York.
- Esri. 2018. *An Introduction to LiDAR Data*. New York. [Prieiga per internetą](#).
- Esri. 2019. *Estimating forest canopy density and height*. New York. [Prieiga per internetą](#).
- Esri. 2021. *LAS dataset to create DTM and DSM rasters*. New York. [Prieiga per internetą](#).
- Geoportal. 2022. *Lidar_DR_LT - skaitmeniniai erdviniai lazerinio skenavimo taškų duomenys (2019-2021 m.)*. Vilnius. [Prieiga per internetą](#).
- GISGeography. 2022. *15 LiDAR Uses and Applications*. New York. [Prieiga per internetą](#).
- GLAD. 2019. *Global Forest Canopy Height*. Washington. [Prieiga per internetą](#).
- Grebner L. D., Bettinger P., Siry J. 2014. *Introduction to Forestry and Natural Resources*. Cambridge.
- Hudak T. A., Evans S. J., Smith S. M. A. 2009. *LiDAR Utility for Natural Resource Managers*. Lewiston.
- Young J. 2011. *LiDAR For Dummies*. New Jersey.

- Juodkienė V. 2018. *Hiperspektrinio skenavimo galimybės medžių charakteristikoms įvertinti*. Akademija. /Daktaro disertacija/
- Kauno miškų ir aplinkos inžinerijos kolegija. 2017. *Miškininkystė ir kraštotvarka*. Kaunas.
- Kelly M., Di Tommaso S. 2020. *Mapping forests with LiDAR provides flexible, accurate data with many uses*. Sacramento.
- Kumar J., Weiner J., Hargrove W. W., Norman P. S., Hoffman M. F., Newcomb D. 2020. *Characterization and classification of vegetation canopy structure and distribution within the Great Smoky Mountains National Park using LiDAR*. Oak Ridge.
- Laes D., Reutebuch E. S. McGaughey J. R., Mitchell B. 2011. *Guidelines to estimate forest inventory parameters from lidar and field plot data*. Salt Lake City.
- Leeuwen M., Nieuwenhuis M. 2010. *Retrieval of forest structural parameters using LiDAR remote sensing*. New York.
- Li W., Niu Z., Shang R., Qin Y., Wang L., Chen H. 2020. *High-resolution mapping of forest canopy height using machine learning by coupling ICESat-2 LiDAR with Sentinel-1, Sentinel-2 and Landsat-8 data*. Beijing.
- Lim K., Treitz P., Wulder M., St-Onge B. 2003. *LiDAR remote sensing of forest structure*. Los Angeles.
- Mažeika J. 2009. *Miškotyra*. Vilnius. [Prieiga per internetą](#).
- Mozgeris G., Juodkienė V., Jonikavičius D., Straigyte L., Gadal S., Ouerghemmi W. 2018. *Ultra-Light Aircraft-Based Hyperspectral and Colour-Infrared Imaging to Identify Deciduous Tree Species in an Urban Environment*. Kaunas.
- Neto C. M. E., Rex E. F., Veras P. F. H., Moura M. M., Sanquetta R. C., Käfer S. P., Sanquetta I., N., M., Zambrano A. M. A., Broadbent N. E., Corte D. P. A. 2020. *Using high-density UAV-Lidar for deriving tree height of Araucaria Angustifolia in an Urban Atlantic Rain Forest*. Boston.
- Peng X., Zhao A., Chen Y., Chen Q., Liu H., Wang J., Li H. 2020. *Comparison of Modeling Algorithms for Forest Canopy Structures Based on UAV-LiDAR: A Case Study in Tropical China*. Beijing.
- Pope E. P. 2020. *Forestry*. London. [Prieiga per internetą](#).

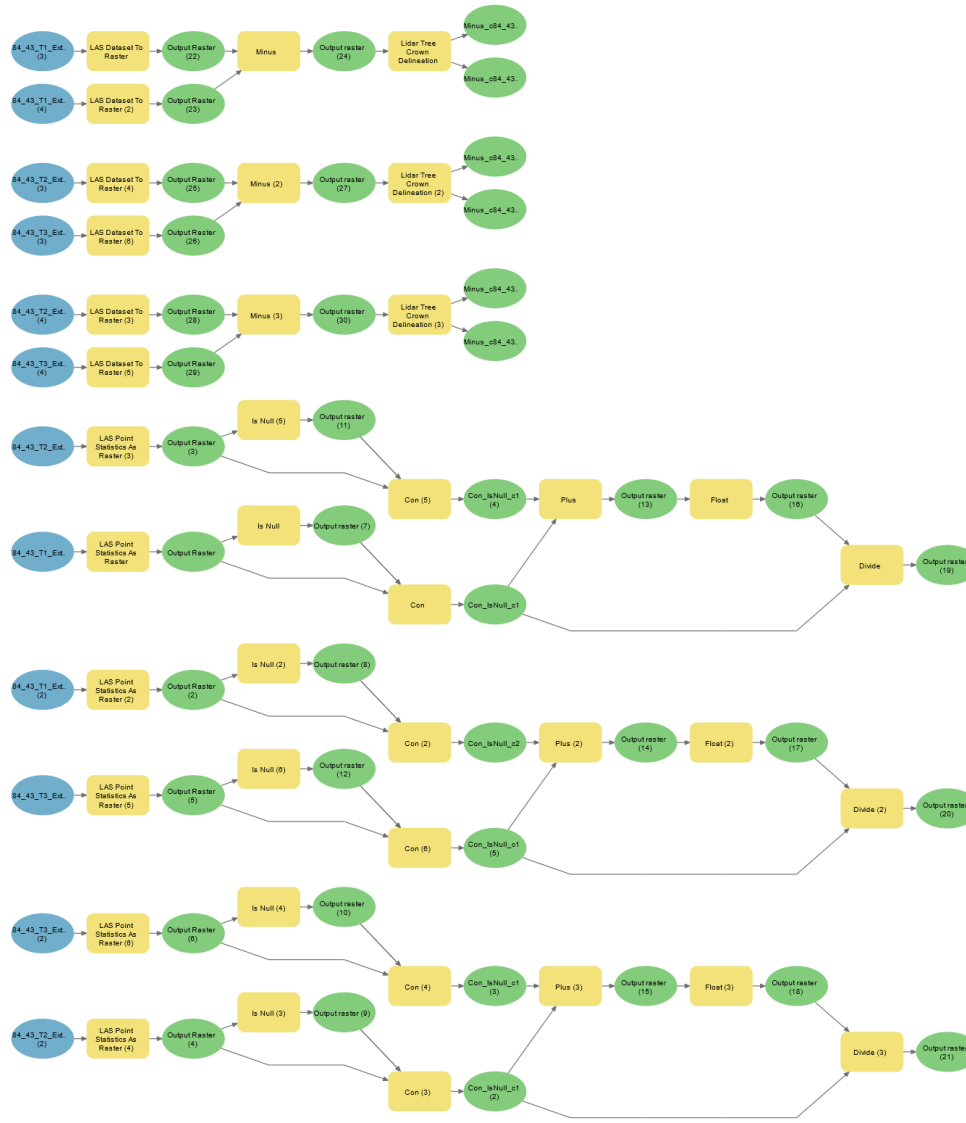
- Renslow M., Greenfield P., Guay T. 2000. *Evaluation of Multi-Return LiDAR for Forestry Applications*. Salt Lake City.
- Rupšys P., Petrauskas E. 2017. *A Linkage among Tree Diameter, Height, Crown Base Height, and Crown Width 4-Variate Distribution and Their Growth Models: A 4-Variate Diffusion Process Approach*. Kaunas.
- Schauberger V. 2000. *The Fertile Earth*. Dublin.
- Schwarz B. 2010. *Mapping the world in 3D*. New York.
- Sharma B. 2021. *What is LiDAR technology and how does it work?*. Noida. [Prieiga per internetą](#).
- SRBC. 2022. *Lidar-derived Individual Tree Inventory using ArcGIS Pro*. Harrisburg. [Prieiga per internetą](#).
- St-Onge B., Achaichia N. 2001. *Measuring Forest Canopy Height Using a Combination of LiDAR and Aerial Photography Data*. Quebec.
- USGS. 2021. *What is remote sensing and what is it used for?*. Reston. [Prieiga per internetą](#).
- Weiskittel R. A., Ayrey E. 2015. *LiDAR and Forestry: Opportunities, Challenges, and Future Directions*. Maine.
- Wooley, T. 2016. *LiDAR Derived Data to Inform Vegetative Structural Conditions*. Flagstaff.
- Zhang Z., Cao L., She G. 2017. *Estimating Forest Structural Parameters Using Canopy Metrics Derived from Airborne LiDAR Data in Subtropical Forests*. Beijing.
- Zhou X., Wang W., Di L., Lu L.m Guo L. 2020. *Estimation of Tree Height by Combining Low Density Airborne LiDAR Data and Images Using the 3D Tree Model: A Case Study in a Subtropical Forest in China*. Beijing.

PRIEDAI

1 priedas. Šaltinio R kodo funkcija pavienių medžių inventoriaus ir savybių analizei

```
tool_exec <- function(in_params, out_params) {
  arc.progress_label("Loading packages...")
  arc.progress_pos(20)
  install.packages("ForestTools")
  library(ForestTools)
  library(raster)
  arc.progress_label("Reading Data...")
  arc.progress_pos(40)
  #Tree Tops
  treetop <- out_params[[1]]
  input_raster <- in_params[[1]]
  canopy <- arc.data2sp(arc.raster(arc.open(input_raster)))
  canopyht <- raster(canopy)
  arc.progress_label("Generating Tree Tops...")
  arc.progress_pos(60)
  lin <- function(x){x * .05 + 3.5}
  minht <- in_params[[2]]
  ttops <- vwf(CHM = canopyht, minHeight = minht, minWinNeib = "rook", winFun = lin)
  arc.write(treetop, ttops)
  arc.progress_label("Generating Crown Polygons...")
  arc.progress_pos(80)
  #Crowns
  crownpoly <- out_params[[2]]
  crowns <- mcws(treetops = ttops, format = "polygons", CHM = canopyht, minHeight = 15, verbose = FALSE)
  arc.write(crownpoly, crowns)
  return(out_params)
}
```

2 priedas. Miško ploto komponentinio vertinimo modelis



Data

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO VERTINIMO LAPAS

Darbo autorius:
(vardas, pavardė) (parašas)

Mokslinis darbo
vadovas:
(mokslinis laipsnis, mokslinis vardas, vardas, pavardė) (parašas)

Recenzentas:
(mokslinis laipsnis, mokslinis vardas, vardas, pavardė) (parašas)

Kartografijos ir
geoinformatikos
katedros vadovas:
(mokslinis laipsnis, mokslinis vardas, vardas, pavardė) (parašas)

Darbo gynimo data:

Darbo įvertinimas:
(balas skaičiumi, balas raštu)

Baigiamųjų darbų gynimo
komisijos pirmininkas:
(mokslinis laipsnis, mokslinis vardas, vardas, pavardė) (parašas)

Baigiamųjų darbų gynimo
komisijos sekretorius:
(vardas, pavardė) (parašas)