

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Metsätalouden koulutusohjelma

Jaakko Moilanen

LÄHI-INFRAPUNAKAMERALLA VARUSTETUN
MIEHITTÄMÄTTÖMÄN KUVAUSKOPTERIN
KÄYTTÖMAHDOLLISUUDET TAIMIKON HOITOTARPEEN
ARVIOINNISSA

Opinnäytetyö
Lokakuu 2017



OPINNÄYTETYÖ
Lokakuu 2017
Metsätalouden koulutusohjelma

Karjalankatu 3
80220 JOENSUU
013 260 600

Tekijä
Jaakko Moilanen

Nimeke
Lähi-infrapunakameralla varustetun miehittämättömän kuvauskopterin käyttömahdollisuudet taimikon hoitotarpeen arvioinnissa

Toimeksiantaja
Metsänhoitoyhdistys Ylä-Kainuu

Tiivistelmä

Miehittämättömän ilma-aluksen käyttöä metsätaloudessa tutkitaan, ja mielenkiinto aihetta kohtaan on lisääntynyt laitteiston hinnan alennettua viime vuosina. Suomen metsissä kasvaa taimikoita, joista odotetaan kasvavan tulevaisuuden raaka-ainetta puunkäytön lisääntyessä tulevaisuudessa. Uusia menetelmiä taimikon inventointiin kannattaa etsiä.

Tässä opinnäytetyössä selvitettiin miehittämättömien ilma-alusten käyttöä metsätaloudessa, ja keskityttiin erityisesti taimikon tutkimukseen lähi-infrapunasensorilla. Tutkimus suoritettiin kuvamalla taimikoita kuvauskopterilla ja analysoimalla kerätystä kuvamateriaalista tuotettua normalisoitua kasvillisuusindeksiä. Indeksistä selvitettiin, voiko käytetyllä menetelmällä havaita tiheyden vaihteluja taimikossa.

Tuloksista selvisi, että lähi-infrapunasensorista saadusta kuvamateriaalista tuotetulla normalisoidulla kasvillisuusindeksillä voidaan tarkastella tiheyden vaihtelua taimikossa auttavasti. Parempi menetelmä on kuitenkin väärävärikuva. Sellaisenaan tässä käytetty menetelmä ei sovellu muuhun kuin tutkimustarkoituksiin. Jotta menetelmää hyödynnettäisiin, tulisi siitä kehittää tuote, joka tuo jotain uutta ja työtä tehostavaa taimikon inventointiin. Mahdollisia taimikoihin liittyviä jatkokehitysideoita on taimikon terveyden arvioiminen metsätuhojen vähentämiseksi, taimikonhoidon työjäljen tarkastaminen, taimikonhoitotarpeen tutkiminen ja metsän viljelyssä onnistuminen.

Kieli

Suomi

Sivuja 48

Liitteet 2

Liitesivumäärä 2

Asiasanat

Miehittämätön ilma-alus, lähi-infrapuna, taimikko, kaukokartoitus, väärävärikuva



THESIS
October 2017
Degree Programme in Forestry

Karjalankatu 3
80220 JOENSUU
013 260 600

Author
Jaakko Moilanen

Title
The Possibilities of Unmanned Near-Infrared Sensor Equipped Rotary Wing Drones in Assessing the Need for Tending in Seedling Stands

Commissioned by
Metsänhoitoyhdistys Ylä-Kainuu

Abstract

The use of unmanned aerial vehicles is studied in forestry. Since the price of the equipment has declined in recent years, the interest towards the subject has grown. There are seedling stands growing in Finnish forests which are, as the demand for wood-based material increases in the future, expected to fulfil these expectations. It is worthwhile to search new methods for the evaluation of seedling stands.

This thesis was done to explain the current studies in the field of using unmanned aerial vehicles in forestry applications and focus was especially in studying seedling stands with a near-infrared sensor. This study was carried out by remote sensing seedling stands with a rotary wing drone equipped with a near-infrared sensor. Then data was analysed by creating a normalized difference vegetation index. Index was analysed to figure out if sensing the changes in density of seedlings was possible.

The results showed that from the data gathered with the near-infrared sensor it was possible to somewhat observe changes in the seedling stand density. Though there are more sufficient methods available such as Color-Infrared images. As such, the methods used are not suitable for other than research purposes. For this method to be used, it should be made into a complete product that would bring something new and time-saving to current methods that are used. A few ideas for further development could be for example the evaluation of the health of seedling stands in order to avoid upcoming forest damage, reviewing the quality of young seedling stand cleaning, the assessment of the need for tending of seedling stands and the success in forest cultivation.

Language

Finnish

Pages 48

Appendices 2

Pages of Appendices 2

Keywords

Unmanned aerial vehicle, near-infrared, seeding stand, remote sensing, color-infrared imagery

Sisältö

1	Johdanto	5
2	Kaukokartoitus.....	6
2.1	Sähkömagneettinen säteily	6
2.2	Säteilyn ja ilmakehän vuorovaikutus.....	8
2.3	Kohteen ominaissäteily	9
3	Ortokuvaus.....	10
3.1	Ortokuvien oikaisu.....	11
3.2	Mosaikointi.....	13
4	Lähi-infrapunakuvaus	15
4.1	Normalisoitu kasvillisuusindeksi.....	16
4.2	Väärävärikuva	17
5	Miehittämättömän ilma-aluksen käyttökohteet metsätaloudessa.....	19
5.1	Metsikkötason puustotunnusten estimointi stereofotogrammetrialla	20
5.2	Maastopalojen seuranta.....	21
5.3	Sairaudet lämpökuvauksella.....	22
6	Miehittämättömiä ilma-aluksia koskeva lainsäädäntö.....	22
7	Tutkimuksen tarkoitus	25
8	Tutkimuksen toteutus.....	26
8.1	Opinnäytetyön menetelmälliset valinnat.....	26
8.2	Kuvauskohteri DJI Phantom 4.....	27
8.3	RGB-kamera.....	28
8.4	Sentera NDVI-sensori	29
8.5	Lennon suunnittelu.....	29
8.6	Lennon suorittaminen	31
8.7	Vertailevat maastokoealat	32
8.8	Kuvamateriaalin käsittely ja tulkinta	33
9	Tutkimustulokset	34
9.1	Männyn taimikon tulokset	35
9.2	Kuusen taimikon tulokset.....	37
10	Pohdinta.....	40
10.1	Tulosten tarkastelu.....	40
10.2	Toteutuksen ja menetelmän tarkastelu	44
10.3	Eettisyyden ja luotettavuuden tarkastelu	45
10.4	Jatkotutkimus- ja kehittämisideat	46
	Lähteet	47

Liitteet

- Liite 1 Vertailevien maastokoealojen puustotiedot männyn taimikosta
Liite 2 Vertailevien maastokoealojen puustotiedot kuusen taimikosta

1 Johdanto

Suomessa on pitkät perinteet metsien inventoinnista. Metsäasiantuntijalla on käytössään VMI:n (valtakunnan metsien inventointi) tuottamaa tietoa muun muassa metsävaroista, metsien terveydentilasta ja luonnon monimuotoisuudesta. Sen lisäksi metsäasiantuntija kerää itse tietoa metsästä maastokäynneillään. Hän tarvitsee tietoa päätöksenteon tueksi. Toisin kuin maastokäynnillä kerätty tieto, VMI:n kaukokartoitettu tieto on yleisluontoisempaa ja soveltuu paremmin isojen alueiden tarkasteluun. Lisäksi kaukokartoitettua tietoa, kuten latvuston korkeusmallia, ei välttämättä ole saatavilla kaikkialta. Sieltä, mistä sitä on saatavilla, tieto voi olla vanhentunutta. Metsäasiantuntija haluaa käyttöönsä aina ajantasaisimman tiedon päätöksenteon tueksi. Tiedonkeruu voi olla aikaa vievää ja kallista. Siksi työaikaa säästäviä ja helpottavia keinoja kannattaa tutkia.

Ilmasta näkee laajojakin alueita nopeammin kuin maastossa mittaamalla. Viime aikoina miehittämättömät ilma-alukset ovat alkaneet yleistyä. Niiden saatavuus on helpottunut ja hinta laskenut. Ilma-aluksella saadaan kerättyä metsästä ajantasaista tietoa nopeamassa aikataulussa ja edullisemmin kuin perinteisillä kaukokartoitusmenetelmillä. Tutkimusalueet ovat tosin pienempiä.

Euroopan metsätaloudessa suurin osa miehittämättömällä ilma-aluksella tehtävästä tutkimuksesta on keskittynyt puustotunnusten estimointiin. Sen jälkeen eniten tutkitaan metsän terveyttä, puulajisuhteita, metsäpalojen valvontaa, latvuston aukkoisuutta ja hakkuunjälkeistä maaperän uppoamaa tai siirtymää. Sensorin teknologian mukaan tutkimuksissa käytetään eniten näkyvän valon aallonpituuksilla mittaavaa RGB-sensoria. Sen jälkeen yleisimmin käytetään eri aallonpituuksien infrapunasäteilyä.

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin lähi-infrapunakameralla varustetun kuvauskohterin käytökelpoisuutta arvioitaessa taimikon tiheyttä ja tiheyden vaihtelua. Taimikko kuvattiin kuvauskohteriin kiinnitetyllä lähi-infrapunakameralla.

Saaduista kuvista arvioitiin visuaalisesti taimikon tiheyttä normalisoidulla kasvillisuusindeksillä ja lehtipuuosuutta väärävärillä. Kuvilta tulkittavia tiheimpiä ja väljimpiä kohtia verrattiin maastossa mitattuihin puustotunnuksiin. Tavoitteena oli selvittää, soveltuuko tämä teknologia tällaiseen taimikon inventointimenetelmään.

2 Kaukokartoitus

”Kaukokartoitus (Remote Sensing) on etäällä olevan kohteen tunnistamista, sen määrän, laadun ja tilan arviointia”. (Pukkala 1988, 4). Kohteesta mitataan sähkömagneettista säteilyä, joka heijastuu mitattavasta kohteesta tai on kohteen itsensä lähettämää. Säteilyn havainnoinnin lisäksi kaukokartoitukseen kuuluu kerätyn tiedon jatkokäsittely. Määritelmään luetaan kuuluvaksi myös valokuvaus ja tähtitiede, mutta yleensä kaukokartoituksesta puhuttaessa tarkoitetaan ilmastai avaruudesta käsin tapahtuvaa maan havainnointia. (Pukkala 1988, 4.)

Kaukokartoitusjärjestelmät voidaan jakaa passiivisiin ja aktiivisiin kaukokartoitusjärjestelmiin. Passiivisessa kaukokartoituksessa ilmaisim kerää kohteen emittoimaa (lähettämää) tai heijastamaa säteilyä. Aktiivisissa kaukokartoitusjärjestelmissä käytetään mittalaitteen itsensä lähettämää säteilyä, joka heijastuu tutkittavasta kohteesta. (Kangas, Päivinen, Holopainen & Maltamo 2011, 129.)

Kun verrataan kaukokartoitusta perinteiseen maastossa tapahtuvaan metsien inventointiin, voidaan menetelmässä huomata etuja. Kaukokartoituksella saadaan edullisesti tietoa laajoilta alueilta. Muutokset kohteessa huomataan, kun verrataan eri ajankohtina otettuja kuvia. Numeerisella kaukokartoitusaineistolla vältytään arvioijan tekemiltä virheiltiltä, sillä niistä tehdyt analyysit ovat arvioijasta riippumattomia. Kaukokartoituksen avulla nähdään myös ne valon aallonpituusalueet, joita ihmisilmin ei näe. Kaukokartoitusta rajoittaa kuitenkin esimerkiksi sääolosuhteet sekä aineiston geometrinen erotuskyky ja tarkkuus. (Kangas ym. 2011, 129.)

2.1 Sähkömagneettinen säteily

Aaltomallin mukaan sähkömagneettinen säteily on valon nopeudella leviävää poikittaista aaltoliikettä sähkökentässä ja tätä vastaan kohtisuorassa magneettikentässä. (Pukkala 1988, 9). Aaltoliike muodostuu sähköisesti varautuneen hiukkasen sähkö- ja magneettikentän värähdellessä. Aaltoliikkeellä on kolme ominaisuutta, jotka ovat: aallonpituus, taajuus ja amplitudi. Aallonpituus on välimatka aaltoliikkeen kahden maksimiarvon välillä. Taajuus on tietyn pisteen tietyssä ajassa ohittavien aaltojen määrä. Amplitudi kuvaa

jakson aallon korkeutta, jota mitataan spektrisenä irradianssina. Taajuuden yksikkö on hertsi (Hz) ja amplitudin yksikkö on $W/m^2/\mu m$. (Tokola, Hyppänen, Miina, Vesa & Anttila 1998, 3.) Pitkääaltoisen säteilyn frekvenssi eli taajuus on pienempi kuin lyhytaaltoisen ja päinvastoin. Koska säteily leviää valon nopeudella, saadaan kaava, jossa valon nopeus on säteilyn taajuuden ja aallonpituuden tulo:

$$c = L * f, \quad L = c / f, \quad f = c / L,$$

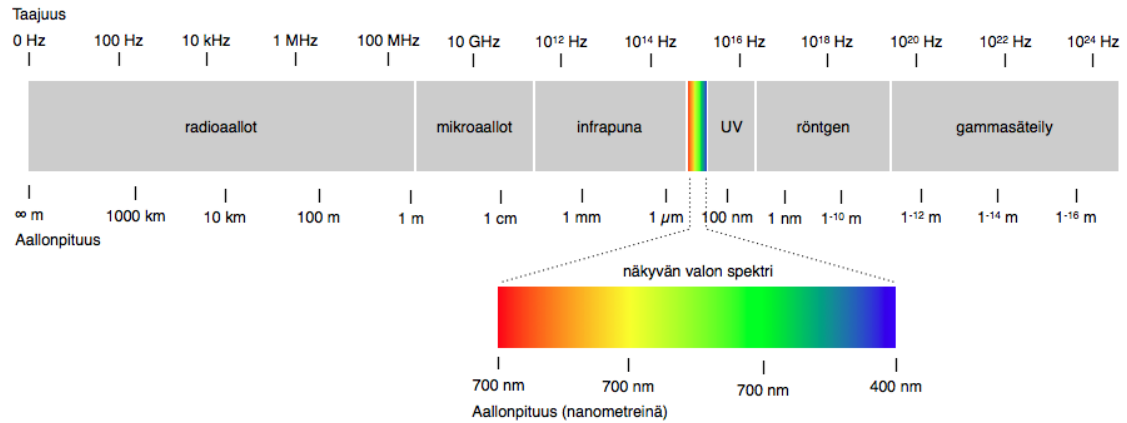
jossa L = aallonpituus ja f = frekvenssi, eli taajuus. (Pukkala 1988, 9–10.)

Hiukkasmallin mukaan valo koostuu hiukkasista (fotoneista eli kvanteista). Tällä selitetään osa säteilyn ominaisuuksista. On havaittu, että aallonpituuden kasvaessa säteilyn energiasisältö pienenee. Tämä nähdään yhtälöstä

$$E = h * f = h * c / L,$$

missä E on yhden kvantin energia (J) ja h Planckin vakio ($6.626 \cdot 10^{-34}$ Js). Koska sähkömagneettisen säteilyn aallonpituus vaihtelee huomattavasti, vaihtelee myös säteilyn energia yhtä lailla. Tämän johdosta geometrinen erotuskyky heikkenee, mikäli käytetään pitkiä aallonpituuksia. Pitkää aallonpituutta käyttäessä havaittavan signaalin aikaansaamiseksi on säteilyä kerättävä laajalta alueelta. (Pukkala 1988, 10–11.)

Sähkömagneettisen säteilyn kaikkien aallonpituuksien jatkuvaa kokonaisasteikkoa nimitetään spektriksi (kuvio 1). Useimmiten kaukokartoituksessa havainnoidaan vain aurinkosta peräisin olevaa säteilyä: näkyvää valoa ja infrapunasäteilyn alueita. Näiden lisäksi aurinko säteilee ultravioletti- ja röntgensäteilyä, joita kaukokartoituksessa ei perinteisesti hyödynnetä. (Tokola ym. 1998, 3.)



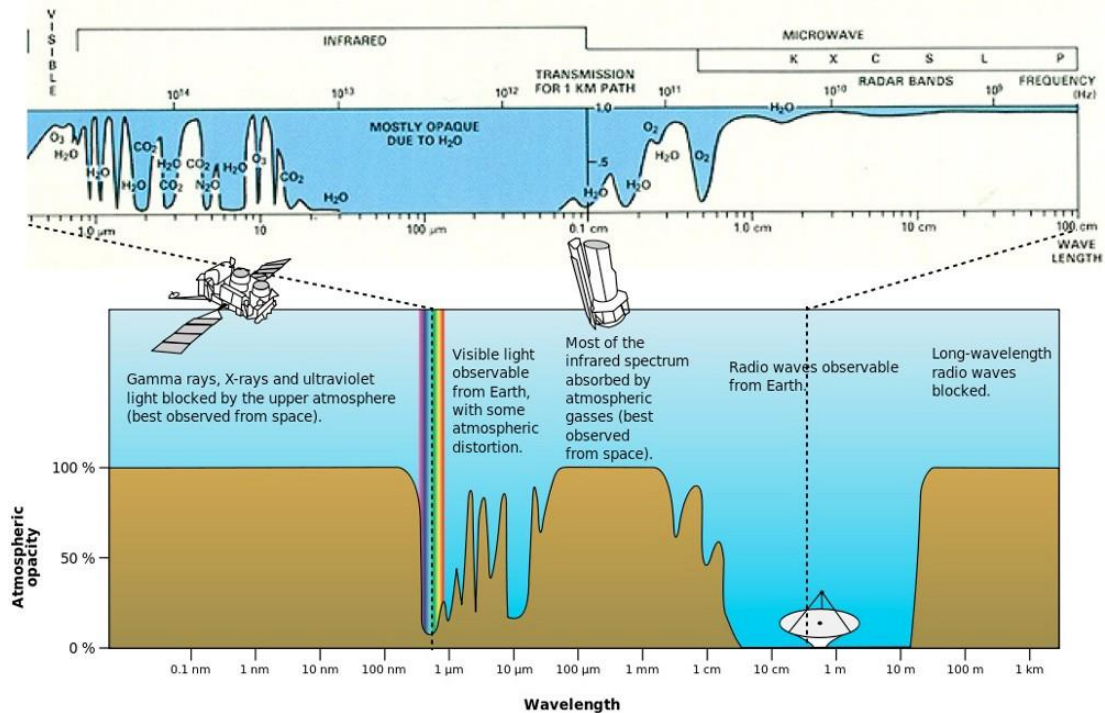
Kuvio 1. Sähkömagneettisen säteilyn spektri (Kuvio: Aaltomuoto 2017).

2.2 Säteilyn ja ilmakehän vuorovaikutus

Säteily joutuu kulkemaan jopa kahdesti paksujen ilmakerrosten läpi ennen kuin se havaitaan mittalaitteessa. Ilmakehä muokkaa säteilyä. Se aiheuttaa säteilyn taittumista, hidastaa sen kulkemista ja muuttaa säteilyn spektristä jakaumaa. Muuntumista aiheuttaa sironta, absorptio ja taipuminen. Kaiken yhteisvaikutuksena kontrasti pienenee ja säteily vaimenee. (Pukkala 1988, 14-17.)

Sironnassa ilmakehän hiukkaset ja kaasujen molekyylit muuttavat säteilyn energian suuntaa ja intensiteettiä. Sironnan vuoksi sinisen ja ultravioletin aallonpituusalueita ei voida hyödyntää kaukokartoituksessa. (Tokola ym. 1998, 4.) Ilmakehässä sironnut säteily sisältää kohteesta heijastuneen valon lisäksi hajavaloa, jonka määrä ei riipu kohteen säteilyominaisuuksista. (Pukkala 1988, 15.)

Absorptiossa säteily törmää ilmakehän molekyyliin, joiden värähtelytaajuus kohtaa säteilyn taajuuden. Siinä molekyyli virittyy säteilyn energiasta. Kun viritys laukeaa, molekyylin emittoima säteilyn taajuus muuttuu. Ilmakehä absorboi eri aallonpituuksia eri tavoin. Osa taajuuksista ei läpäise ilmakehää ollenkaan. Tämän takia niitä ei käytetäkään kaukokartoituksessa. Aallonpituuksia, jotka läpäisevät ilmakehän helposti, kutsutaan ilmakehän ikkunoiksi (kuvio 2). (Pukkala 1988, 16.)



Kuvio 2. Ilmakehän ikkunat (Siegel 2016).

Kolmas ilmiö, valon taipuminen, tapahtuu eri tiheyksisten kaasukerrosten rajalla. Tämä vaikeuttaa kartanvalmistusta, kun ei tiedetä mistä tiettyyn kohtaan saapuva valo on lähtöisin. (Pukkala 1988, 17.) Taipumisessa säteilyn suunta vaihtuu kahden väliaineen rajalla. (Tokola ym. 1998, 4). Edellä mainitut ilmakehän vaikutukset eivät liene kovin merkittäviä miehittämättömällä ilma-aluksella kuvattaessa matalalta lentokorkeudelta.

2.3 Kohteen ominaissäteily

Kaikki kohteet heijastavat, emittoivat ja absorboivat säteilyä sille ominaisella tavalla. Kun kaukokartoituksessa kerätään tietoa kohteen ominaisuuksista, käytetään hyväksi kohteen heijastamaa ominaissäteilyä. Muun muassa ilmakehän ominaisuudet, mittausajankohta ja -geometria ovat kohteiden ominaisuuksien lisäksi vaikuttavia tekijöitä avaruudessa vastaanotetun säteilyn määrään. Ominaissäteilyn tunteminen auttaa valittaessa kohteen erottumisen kannalta tärkeitä asioita: soveltuva spektrin alue, kaukokartoitusjärjestelmä sekä paras vuoden- ja vuorokaudenaika. (Tokola ym. 1998, 7.)

Spektrissä on huomattava heijastuksen nousu valon ja infrapuna-alueen rajalla. Tätä ilmiötä kutsutaan kulminaatioksi. Vihreät kasvinlehdet absorboivat ultraviolettisäteilyä, nä-

kyvää valoa ja pitkää infrapunäsäteilyä voimakkaasti. Siihen väliin jäävä lähi-infrapunäsäteilyä puolestaan hyvin vähän. Lähi-infrapunan heijastussuhteen määrää lehden sisäinen solukkorakenne. (Tokola ym. 1998, 12.) Tämän vuoksi kaukokartoituksessa käytetään infrapunakuvausta. Havu- ja lehtimetsän ominaissäteily on hyvin samankaltaista keskenään. Infrapunan alueella kuitenkin lehtimetsä säteilee enemmän lähi-infrapunäsäteilyä kuin havumetsä. Tällöin lehtimetsät erottuvat havumetsiä vaaleampina. (Pukkala 1988, 19.)

3 Ortokuvaus

Kaukokartoituksessa ortokuva on karttaprojektioon oikaistu kuva, joka tuotetaan ilma- tai satelliittikuvista. Ortokuvauksen edellytys on se, että kuvattavalta alueelta on saatavissa korkeusmalli. Sitä tarvitaan kuvan orto-oikaisuun, jossa kuvan perspektiivi muutetaan keskusprojektiokuvasta kohtisuoraksi yhdensuuntaisprojektioksi. (Haggrén & Honkavaara 2005, 1.)

Ortokuvaus pyritään tekemään nadiirikuvauksena. (Haggrén & Honkavaara 2005, 1). Nadiirikuvauksessa optinen akseli osoittaa maapallon keskipisteeseen. Nadiiri on piste, jossa kohtisuoraan linssin alapuolella ollut kohta näkyy kuvalla. (Pukkala 1988, 95.) Nadiirikuvauksessa tavoitellaan kapeaa kuvakulmaa. Tähän päästääkseen kamerassa käytetään pidempää polttoväliä, kuvataan korkeammalta tai otetaan kuvia suuremmilla malli- ja jonopeitoilla. Korkeammalta kuvattaessa kuvan sisäiset mittakaavaerot pienevät. Kapean avauskulman ansiosta valaistus on tasaista ja näkyvyys maanpintaan on hyvä koko kuvan alueella. (Haggrén & Honkavaara 2005, 1-4.)

Ortokuva lasketaan käyttämällä tarkoituksenmukaista ohjelmistoa. Ortokuvan muodostus on eräajotyypinen prosessi. Siinä syöttötietoina ovat kuvat, orientointitiedot ja korkeusmalli. Ortokuvien laskentaa seuraava vaihe on kuvamosaiikkien muodostus ja kuvan sävyjen käsittely. Tämä voidaan tehdä mm. fotogrammetrisilla ohjelmistoilla tai kaukokartoitusohjelmistoilla. (Haggrén & Honkavaara 2005, 2.)

Ortokuva käsitteenä ei ole tarpeeksi tarkka. On olemassa Maanpintaortokuva ja tosiortokuva. Erot johtuvat käytettävästä korkeusmallista. Maanpintaortokuva muodostetaan käyttäen maanpintaa kuvaavaa korkeusmallia (DTM). Tosiortokuva muodostetaan käyt-

täen kohteen pintamalla (DSM). Maanpintaortokuvassa vain maanpinta on ortogonaaliprojektiossa. Tosiortokuvassa kaikki kohteet ovat ortogonaaliprojektiossa. Kun tosiortokuvassa rakennetutkin kohteet ovat oikaistuja, maanpintaortokuvassa korkeusmalliin kuulumattomat rakennetut kohteet pysyvät perspektiivisesti vääristyneinä. Näillä ortokuvatyypeillä on myös välimuoto. Siinä rakennetut kohteet oikaistaan oikealle korkeudelle, mutta muilta osin oikaisu suoritetaan maanpinnan mukaan. (Fotogrammetrian ja kaukokartoituksen seura 2005, 8.)

Ortokuvatuotannossa käytetään 3D-korkeusmallia. Siinä jokaisella pisteellä on XYZ-koordinaatti. Tähän soveltuvia korkeusmalleja ovat ruutumalli tai hajapisteistö (TIN). Korkeusmalliin voi liittyä myös taiteviivoja. Rasterimuotoinen korkeuskäyräkuva ei sovellu ortokuvatuotantoon ilman muokkausta. Se muunnetaan ensin vektorimuotoon, minkä jälkeen ruutumalliksi tai hajapisteistöksi. Korkeusmallilla on olennainen vaikutus ortokuvan geometriseen tarkkuuteen. (Fotogrammetrian ja kaukokartoituksen seura 2005, 26.)

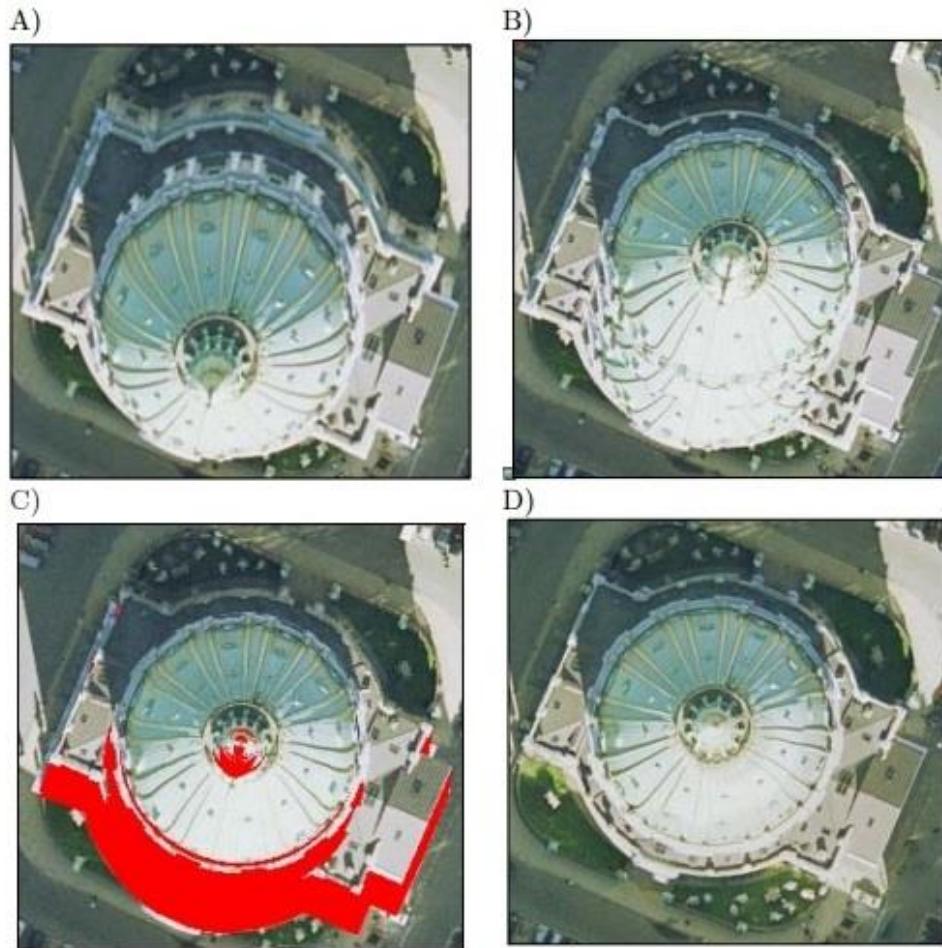
3.1 Ortokuvien oikaisu

Ortokuva saadaan tekemällä ilmakuvalla geometrinen kuvamuunnos. Siinä suoritetaan koordinaattimuunnos ja sävyarvojen interpolointi. Oikaisussa käytetään koordinaattimuunnoksena kollineaarisuusyhtälöä, johon tarvitaan tietoa ortokuvapisteiden korkeuksista sekä oikaistavan kuvan sisäisten ja ulkoisten orientointien tuntemista. (Fotogrammetrian ja kaukokartoituksen seura 2005, 7.)

Orto-oikaisussa sisäinen orientointi, eli kuvakoordinaatisto ja pääpisteen sijainti kuvakoordinaatistossa, määritetään kameraparametrien avulla. Numeeristen ilmakuvien sisäiseen orientointiin tarvitaan: kameravakio, pääpisteen sijainti kuvakeskukseen nähden, kuvan reunamerkkien kuvakoordinaatit ja mahdollisesti tietoa muun muassa kameran linssien vääristymistä. Ulkoinen orientointi määrittää muunnoksen kuvakoordinaatistosta karttakoordinaatistoon tukipisteiden avulla. Ulkoisessa orientoinnissa selviää sensorin sijainti karttakoordinaatistossa, lentokorkeus, kallistumat ja näiden virhe-estimaatit. (Tokola ym. 1998, 71-72.) Sisäisen ja ulkoisen orientoinnin lisäksi orto-oikaisussa käytetään korkeusmallia, jolla korjataan maaston korkeuden aiheuttamat virheet kohteiden sijaintiin. (Tokola ym. 1998, 72).

Ortokuvan yleinen ongelma on se, että se ei kestä nopeita maaston korkeuden vaihte-
luita. Sivuttaissiirtymä voi kasvaa niin merkittäväksi, että korkeat kohteet jättävät taak-
seen piiloon muita kohteita. Normaali ortokuva oikaistaan maanpinnan korkeusmallin
mukaan, joka ei sisällä rakennuksia tai kasvillisuutta. Tästä johtuen rakennukset ja kor-
kea kasvillisuus nojaavat kuvakeskuksesta, nadiirista, pois päin. Lisäksi vain kohteet,
jotka ovat lähellä maanpintaa tulevat projisoitua oikein. (Nielsen 2004, 9.)

Tosiortokuvassa käytetään korkeusmallia, joka sisältää myös korkeammat kohteet, ku-
ten rakennukset. Kohteen pintamallia (DSM) käyttämällä rakennukset saadaan oikaistua
takaisin sen oikeaan sijaintiin, mutta se jättää myös haamukopion rakennuksesta. Uu-
delleen projisoitaessa säteet siirtyvät kohteen lisäksi kohteen taakseen piilottamaan si-
jaintiin (Kuvio 3). Tosiortokuva pyrkii paljastamaan piilossa olevat kohteet ja samalla
mahduttaa mahdollisimman paljon kohteita pintamallista. Jotta piilossa olevista kohteista
saataisiin palautettua suurin osa, niiltä alueilta tarvitaan ilmakuvia. Lisäkuvia saadaan
kuvaamalla maasto kuvapeitolla, jossa samasta alueesta otetaan kuvia eri sijainneista.
Tällöin jokaiseen kuvaan saadaan erilainen sivuttaissiirtymä. Yhdistämällä kuvat saa-
daan täysi kattavuus. Lopputuloksena piilossa olevat ”sokeat pisteet” paikannetaan ja
täytetään automaattisesti tietoa muista kuvista, joilla kohde on näkyvillä. (Nielsen 2004,
9-10.)



Kuvio 3. Maanpintaortokuvan ja tosiortokuvan ero (Nielsen 2004).

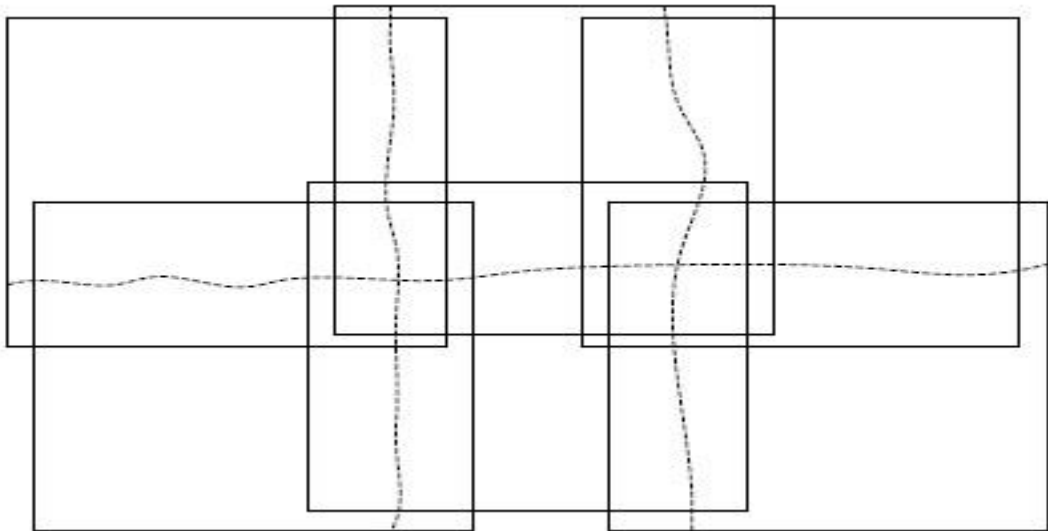
Kuvasta 3 selviää maanpintaortokuvan ja tosiortokuvan ero: A) Ortokuva oikaistu maanpinnan korkeusmallilla (DTM). Rakennus ei ole siirtynyt todelliseen sijaintiinsa. B) Ortokuva oikaistu kaupungin pinnan korkeusmallina (DSM). Rakennus on oikaistu todelliseen sijaintiinsa, mutta haamukopio on jäänyt. C) Kuten B:ssä, mutta piiloutunut alue on paikallistettu. D) Tosiortokuva, jossa piilossa olleet alueet on korvattu toisten kuvien materiaalilla. (Nielsen 2004, 12.)

3.2 Mosaikointi

Ortokuvaprojekteissa käsitellään usein laajaa aluetta. Jotta laaja, yhtenäinen ortokuva saataisiin aikaiseksi, kaksi tai useampi kuva yhdistetään toisiinsa. Tätä kutsutaan mosaikoinniksi. Mosaikin luomiseen kuuluu monia vaiheita: liitoskohtien luominen, värien tasaaminen, häivytyksen ja valotuksen vähentäminen tietyillä alueilla. (Nielsen 2004, 7.)

Liitoskohta mosaikoinnissa määrittää sen, missä kohtaa kuvat yhdistyvät toisiinsa. Liitoskohtien luomiseen on automaattisia ja manuaalisia menetelmiä. Tavoitteena on liittää kuvat toisiinsa kohdista, jotka muistuttavat toisiaan eniten. Yksi helpoimpia manuaalisia menetelmiä on yhdistää kuvat tien keskelle. Tie on homogeeninen alusta, jossa kuvien eroavaisuudet eivät ole helposti havaittavissa. Automaattisia menetelmiä on useita. Yksinkertainen menetelmä on sijoittaa liitoskohta kuvien päällekkäin limittyvien osien keskelle (kuva 4). (Nielsen 2004, 7.)

Mosaikoitavien kuvien tulisi olla saman piirteisiä keskenään liitoskohdistaan. Jotta liitoskohdista tulee sulavat, liitoskohtien väripiirteiden tulisi olla mahdollisimman yhdenmukaiset. Esimerkiksi, jos kuvien kirkkaudessa on iso ero, näkyy se lopputuloksessa selkeänä rajana kuvien liitoskohdassa. Liitoskohtien piilottamiseen on kuitenkin monia keinoja. Kuvien radiometrisiä eroja pienentämällä saadaan sulavampi liitos. Liitoskohtia voidaan lisäksi häivyttää yhteen, jotta kuvat sulautuvat toisiinsa. (Nielsen 2004, 8.)



Kuva 4. Esimerkki kuuden ortokuvan liitoskohtien asettelusta (Nielsen 2004).

Tosiortokuvassa eri kuvat yhdistetään toisiinsa siten, että jokainen kuva korvaa osaa muista kuvista. Tämän vuoksi ortokuvassa kuvien täytyy olla väreiltään yhdenmukaisempia keskenään koko kuvan alueelta. Tosiortokuvissa käytetään automaattista liitoskohtien valintaa, koska mosaiikki koostuu niin monista eri kuvista. (Nielsen 2004, 59.)

4 Lähi-infrapunakuvaus

Lähi-infrapunakuvaus laajentaa fysikaalisten ilmiöiden visualisointia ihmissilmälle näkyvän valon aallonpituusalueen ulkopuolelle. Ihminen näkee valosta aallonpituudet väliiltä 400–700 nm. Tästä aallonpituuden kasvaessa tulee infrapuna-alue 700 nm–1 mm, josta lähi-infrapuna-alue on 700 nm–1,4 µm. (Wikipedia 2017.)

Kameroissa ei ole suurta eroa näkyvän valon tai lähi-infrapun kuvauksissa. Monia kameroita voi muokata siten, että vaihdetaan suotimet estämään osa tai kaikki näkyvän valon aallonpituuksista. Tällöin kameralla voi kuvata joko näkyvän valon aluetta, lähi-infrapuna- tai molempia. Kameran suotimilla ja linseillä voi vaikuttaa havaittavan säteilyn aallonpituusalueeseen ja siten tallennettaviin kuviin. (Mangold, Shaw & Vollmer 2013, 55.) Lisäksi on kameroita, jotka on valmistettu tarkoituksellisesti lähi-infrapunakuvausta varten.

Robert Wood huomasi tutkimuksissaan 1910-luvulla, että kasvillisuus nähdään eri tavalla lähi-infrapunakuvassa. Taivas on tumma ja kasvillisuus on merkillisen kirkasta. (Mangold ym. 2013, 57.) Nykyään lähi-infrapunakuvausta käytetään erityisesti kasvillisuuden tutkimiseen. Valo läpäisee kasvin lehden ulkopintoja peittävän solukerroksen (epidermin), hajoaa lehden syvempiin osiin, jonka soluseinien välissä on ilmaa. Valo siroaa takaisin ilmakehään, josta se havaitaan kuvauslaitteilla. Takaisinsironnan spektrinen jakautuvuus riippuu puulajista. Tästä syystä lehtipuut näkyvät yleensä lähi-infrapunakuvissa kirkkaampina kuin havupuut. (Mangold ym. 2013, 59.)

Lähi-infrapunakuvauksessa kasviin heijastuneesta säteilystä suurempi osa siroaa takaisin ilmakehään kuin näkyvän valon aallonpituuksista. Lähi-infrapunasäteily imeytyy kasvin osiin vähemmän kuin näkyvä valo. Kasvi käyttää näkyvän valon aallonpituuksia yhteyttämisessä ja siksi absorboi sitä lehtivihreään. Lähi-infrapunasäteilyn aallonpituuksien runsaampi heijastuminen johtuu säteilyn siroutumisesta kasvin osien muodoltaan vaihtelevien solujen osiin ja vesipitoisuuksiin. Kasvin terveydentila on havaittavissa esimerkiksi veden määrästä solukossa. Koska veden määrä vaikuttaa kasvista heijastuvan lähi-infrapunasäteilyn määrään, voidaan kasvin terveyttä tutkia sen avulla ennen kuin se on havaittavissa ihmissilmin näkyvän valon aallonpituuksilla. Tätä ilmiötä hyödynnetään

mm. normalisoidussa kasvillisuusindeksissä (NDVI), jossa tutkitaan vihreän kasvillisuuden määrää. (Mangold ym. 2013, 59-60.)

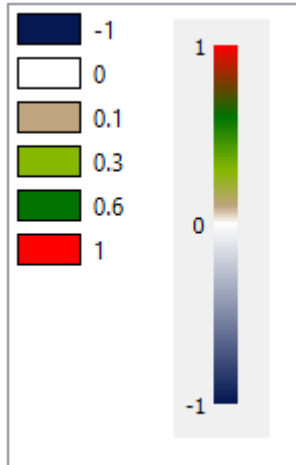
Sen lisäksi, että lähi-infrapun aallonpituudet heijastuvat kasvillisuudesta kirkkaampana kuin näkyvän valon aallonpituudet, kirkkaan ja pilvisen taivaan välillä on korkeampi lähi-infrapun kontrasti. Syy tähän löytyy ilmakehän molekyylien, autereisen ilman ja pilvien kosteuden sirottavasta vaikutuksesta säteilyyn. (Mangold ym. 2013, 62.) Sironta on satunnaista säteilyn suunnan muuttumista, joka voidaan jakaa aallonpituudesta riippuvaan ja riippumattomaan sirontaan. Aallonpituudesta riippuvaa sirontaa on kahdenlaista: Rayleigh- ja Mie-sirontaa. (Pukkala 1988, 14.) Lähi-infrapunakuvauksessa autereisen ilman vaikutukset ovat vähäisempiä kuin näkyvän valon kuvauksessa, mikä on menetelmälle eduksi. Tämä on mahdollista, koska Rayleigh-sirontaa tapahtuu sumuisessa/auer-ilmassa paljon vähemmän lähi-infrapun kuin näkyvän valon spektrisellä alueella. (Mangold ym. 2013, 63.)

4.1 Normalisoitu kasvillisuusindeksi

Normalisoitu kasvillisuusindeksi (Normalized Difference Vegetation Index – NDVI) kuvaa havainnoitavan kohteen vihreän kasvillisuuden määrää. Tässä tutkimuksen tulos on NDVI-kuva, josta pyritään tulkitsemaan taimikon tiheyttä. Kasvien lehtivihreä absorboi voimakkaasti ihmiselle näkyviä valon aallonpituuksia, mutta kasvien solurakenne puolestaan heijastaa lähi-infrapun aallonpituuksia. Tästä syystä harva tai sairastunut puusto heijastaa enemmän näkyvää valoa ja vähemmän lähi-infrapunaa. Terve tai tiheä puusto taas heijastaa vähemmän näkyvää valoa ja enemmän lähi-infrapunaa. NDVI lasketaan matemaattisesti kaavalla

$$NDVI = (NIR - VIS) / (NIR + VIS),$$

jossa NIR on lähi-infrapun aallonpituudet ja VIS on ihmiselle näkyvät valon aallonpituudet. Laskennassa annetulle kuvapikselille tuleva arvo on väliltä (-1) – (+1). (Earth Observatory, 2017.) Alin mahdollinen lukema (-1) osoittaa, että vihreää kasvillisuutta ei ole. Ylin mahdollinen lukema (+1) osoittaa, että vihreää kasvillisuutta on suurin mahdollinen määrä. Muut arvot tulevat tuolle välille ja ne saavat kuvalla värin sen mukaan. Väripaletti valitaan esittäessä käyttötarkoituksen mukaiseksi. Väripaletti määrittää värin, jolla kukin indeksin (NDVI) arvo näytetään (kuvio 5).



Kuvio 5. Tutkimuksessa käytetty väripaletti.

4.2 Väärävärikuva

Yksi lähi-infrapunakuvauksen hyödynnetyin tuote kaukokartoituksessa on ollut väärävärikuva (CIR – Color Infrared). Väärävärikuva on multispektristä dataa, joka sisältää osan näkyvän valon aallonpituuksista sekä lähi-infrapun aallonpituudet. Menetelmä on hyödyllinen erityisesti kasvillisuuden kartoituksessa. (Statewide Mapping Advisory Committee 2011, 3.) Väärävärikuvan ominaisuuksiin kuuluu, että kohteesta heijastuneesta sähkömagneettisesta säteilystä lähi-infrapuna näkyy kuvassa punaisena, vihreä valo sinisenä ja punainen valo vihreänä. (Statewide Mapping Advisory Committee 2011, 2).

Väärävärikuvan hyödynnettävyys kasvillisuuden tutkimisessa perustuu siihen, että vihreä kasvillisuus heijastaa muita kohteita enemmän lähi-infrapun säteilyä. Lisäksi vihreän kasvillisuuden ominaisuudet vaikuttavat kuvalla havaittaviin väreihin. Terve kasvillisuus näkyy kirkkaan punaisena. Sairastunut kasvillisuus menettää lähi-infrapun heijastuskykyään, jolloin se näkyy tumman punaisena. Taimikoiden tutkimuksessa tärkeä ominaisuus väärävärikuvassa on eroavaisuudet lähi-infrapun heijastavuudessa. Kasvillisuustyyppien, esimerkiksi lehtipuuston ja havupuuston, välillä on eroja heijastavuudessa, jolloin ne erottuvat kвалt selkeästi. (Statewide Mapping Advisory Committee 2011, 2.)

Väärävärikuvalla on tiettyjä etuja perinteiseen värikuvaan verrattuna. Lähi-infrapun säteily läpäisee ilmakehän paremmin kuin näkyvän valon aallonpituudet, koska siinä sininen ja violetti suodatetaan. Toinen etu on siinä, miten väärävärikuvassa kohde reagoi lähi-infrapunaan. Reaktio paljastaa ihmisilmälle näkymättömiä ominaisuuksia, kuten

stressaantuneen kasvillisuuden tai lehti- ja havupuun erottaminen toisistaan. (Statewide Mapping Advisory Committee 2011, 2.)

Tietyt värit väärävärivärikuvassa ilmentävät erilaisia havaittavia kohteita. Kirkkaan punaisena nähdään elinvoimainen vihreä kasvillisuus. Vaalean punaisena nähdään kasvillisuus, joka tuottaa vähemmän lehtivihreää, eli esimerkiksi lehtipuusto näkyy vaaleampana kuin havupuusto (kuva 1). Valkoisena, sinisenä, vihreänä tai ruskeana nähdään maaperä, kuollut tai elinvoimaansa menettänyt vihreä kasvillisuus, sakea vesi ja rakennukset ja vastaavat kulttuuriympäristöt. Tumman sinisenä tai mustana nähdään kestopäällystetyt tiet ja vesi. (Statewide Mapping Advisory Committee 2011, 11.)



Kuva 1. Maanmittauslaitoksen väärävärivärikuva tutkimuskohteena olleesta männyn taimikosta.

5 Miehittämättömän ilma-aluksen käyttökohteet metsätaloudessa

Miehittämättömien ilma-alusten käyttö siviilien harrastuksissa ja kaupallisten organisaatioiden toiminnassa on kasvamassa. Ilma-aluksia voidaan käyttää moneen tarkoitukseen, kuten turvallisuusvalvontaan, kadonneitten etsintään, maastopalojen kartoitukseen sekä maa- ja metsätalouden moniin tiedontarpeisiin. Ilmailulainsäädäntö jarruttaa kuitenkin tätä kehitystä erilaisin rajoituksin, kuten 150 metrin enimmäislentokorkeudella. (Tuominen, Balazs, Saari, Pölönen, Sarkeala & Viitala 2015, 2.)

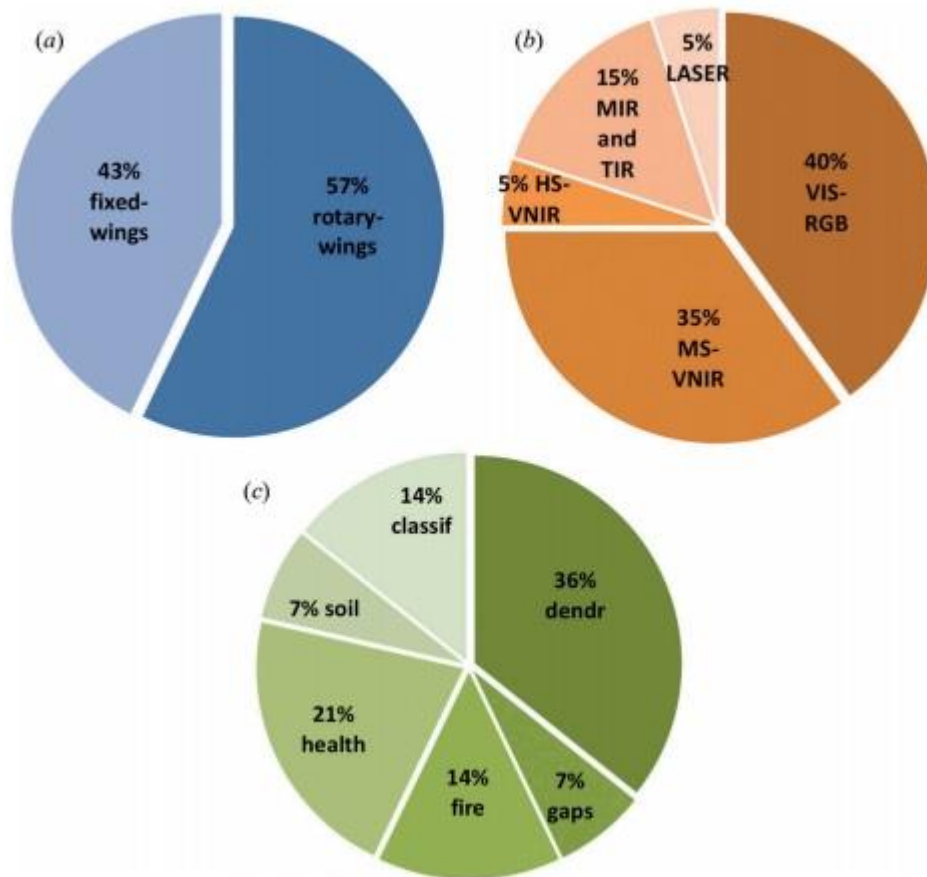
Metsien kaukokartoitukseen miehittämättömät ilma-alukset sopivat joissakin tapauksissa paremmin kuin perinteiset lentokoneet. Ne sopivat paremmin pienien alueiden inventointiin, koska operointikustannukset pysyvät pieninä. Lentokoneiden käyttäminen taloudellisesti vaatii laajoja inventointialueita. Lisäksi ne eivät tarvitse kovinkaan suuria lento-ohjaimia ja laskeutumisalustoja. (Tuominen ym. 2015, 2.) Miehittämättömän ilma-aluksen ohjaamiseen ei tarvita lentotyölupaa, joten niiden käyttäminen on mahdollista paljon suuremmalle joukolle ihmisiä.

Miehittämättömissä ilma-aluksissa on myös heikkouksia, jotka rajoittavat niiden käyttöä. Pieni koko johtaa moniin haittoihin verrattuna perinteiseen lentokoneesta tapahtuvaan inventointiin. Kantokyky on rajallinen, joten se asettaa rajoituksia käytettävissä oleviin sensoreihin. Kevyt rakenne altistaa kovan tuulen heittelylle ja siten mittausarvojen virheille. Toimintasäde on rajallinen, koska voimanlähteen akut tai polttoainesäiliöt ovat pieniä. Ilmailulain määräämä 150 metrin suurin sallittu lentokorkeus rajoittaa käyttöä suuremmilla inventointialueilla, koska se rajoittaa kuvapeittoa ja resoluutiota. Suomessa ilmatilan voi varata etukäteen, jolloin voi lentää korkeammallakin. (Tuominen ym. 2015, 2-3.)

Euroopan metsätaloudessa suurin osa miehittämättömällä ilma-aluksella tehtävästä tutkimuksesta keskittyy puustotunnusten estimointiin. Sen jälkeen eniten tutkitaan metsän terveyttä, puulajisuhteita, metsäpalojen valvontaa, latvuston aukkoisuutta ja hakkuunjälkeistä maaperän uppoamaa tai siirtymää. Sensorin teknologian mukaan tutkimuksissa käytetään eniten näkyvän valon aallonpituuksilla mittaavaa RGB-sensoria. Sen jälkeen

yleisimmin käytetään eri aallonpituuksien infrapunasäteilyä. Laserkeilaus on vähäisintä. Yleisin käyttöalusta on pyöriväsiipinen ilma-alus (kuvio 6). (Torresan, Berton, Carotenuto, Di Gennaro, Gioli, Matese, Miglietta, Vagnoli, Zaldei & Wallace 2016, 2441.) Seuraavaksi esitellään eniten käytettyjä menetelmiä.

2440 C. TORRESAN ET AL.



Kuvio 6. Suhteellinen osuus tutkimuksista a) miehittämättömän ilma-aluksen tyypin mukaan, b) sensorin teknologian mukaan, c) tutkimustarkoituksen mukaan. (Torresan ym. 2016).

5.1 Metsikkötason puustotunnusten estimointi stereofotogrammetrialla

Miehittämättömällä ilma-aluksella voidaan ottaa kuvia, joista tuotetulla kuvamosaiikilla ja stereofotogrammetrialla perustuvalla puuston pintamallilla päästään samaan tarkkuuteen kuin laser- ja ilmakuvaperusteisessa puustotulkinnassa. Kuvamosaiikki tuotetaan orto-oikaisemalla suurella etu- ja sivuttaispeitolla tuotetut ilmakuvat. Samasta aineistosta

tuotetaan laserkeilaukseen perustuvan maaston pintamallin avulla latvuston 3-uloitteinen pituusmalli. Ortokuvaa ja latvuston pintamallia käytetään puustotunnusten estimointiin. (Tuominen 2015, 278.)

Fotogramminen puuston latvusmalli ja laserkeilauksella tuotettu latvusmalli muistuttavat toisiaan sävy ja tekstuuripiirteissään sekä latvusmallin pisteiden korkeusjakaumaa kuvaavissa pisteissä. Niissä on kuitenkin menetelmistä johtuvia eroja. Laserkeilauksella saadaan yhdestä pulssista useita kaikuja, jolloin mitataan latvus eri korkeuksilta sekä maanpintaa. Fotogrammetrinen menetelmä tuottaa vain yhden heijastuksen samasta pisteestä, jolloin sen alle jäävät kohteet jäävät havaitsematta. (Tuominen 2015, 278.)

Tutkimuksissa on havaittu miehittämättömällä ilma-aluksella kuvatun stereofotogrammetriaan perustuvan pintamallin tuottavan yhteneväisiä tuloksia puustotunnusten estimoinnissa lentokoneesta laserkeilattuun aineistoon verrattuna. Laserkeilaukseen verrattuna miehittämättömän ilma-aluksen keräämä tieto on ollut geometrinen yksityiskohtien puolesta runsaampaa, mikä on näkynyt parantuneena yksittäisten puiden havainnointikykyinä. Miehittämättömän ilma-aluksen käyttö on huomioonotettava vaihtoehto alueilla, joilta ei ole saatavissa laserkeilausdataa tai useita peräkkäisiä mittauksia vaaditaan. (Thiel & Schmullius 2016, 2425.)

5.2 Maastopalojen seuranta

Vaikka Suomessa laajat maastopalot ovat harvinaisia, Itä-Euroopan ja Venäjän avopaloista kantautuu savua Suomeen. Tällöin näkyvyys voi heikentyä haitaten lentoliikennettä ja pienhiukkaspitoisuudet voivat kasvaa kaksikymmenkertaisiksi normaaliin verrattuna. (Ilmatieteenlaitos 2017.) Maailmalla metsäpalot vaarantavat ihmisten turvallisuutta ja luonnon elinympäristöjä ja vaikuttavat ravinteiden kiertoon. Merkittävänä kasvihuonekaasujen päästäjänä metsäpalot vaikuttavat ilmanlaatuun ja säätilaan. Vuosittain maailmalla tapahtuu yli 200 000 maastopaloa polttaen pinta-alaltaan alueen, joka vastaa melkein puolta Yhdysvaltojen pinta-alasta. (Hua & Shao 2017, 215.) Edellä mainituista syistä metsäpalon torjuntaan etsitään toimintaa tehostavia keinoja, kuten miehittämien ilma-alusten käyttämistä perinteisten helikoptereiden ja lentokoneiden sijasta tai lisänä.

Metsäpalojen havainnointi perustuu kaukokartoituksessa keskipitkän (3–5 μm) ja pitkän (8–14 μm) infrapunasäteilyn aallonpituusalueiden mittaamiseen. (Hua & Shao 2017, 217.) Miehittämättömään ilma-alukseen kiinnitetyllä sensorilla voidaan tuottaa samaa

tietoa kuin satelliitilla tai lentokoneesta. Miehittämättömällä ilma-aluksella operoiminen säästää kustannuksista ja ei vaaranna ihmishenkiä riskeissä, jotka ovat tunnusomaisia palojen lähellä lentämisessä. Järjestelmä on myös joustava ja nopeasti toimitettavissa alueelle. (Hua & Shao 2017, 219.)

Miehittämättömän ilma-aluksen käyttöä metsäpalojen havainnoinnissa on saatu rohkaisevia kokemuksia maailmalla. Kiinteäsiipiset ilma-alukset on havaittu tarjoavan merkittävää apua lähes reaaliaikaisessa metsäpalon seurannassa. Useasta multikopterista koottu laivue tuottaa reaaliaikaista kuvaa ja on havaittu sopivan laajan alueen seurantaan. (Hua & Shao 2017, 226.)

5.3 Sairaudet lämpökuvauksella

Ilmastolliset olosuhteet vaikuttavat merkittävästi puuston kasvuun ja puolustuskykyyn. Muutos ilmastossa ja sääolosuhteissa aiheuttaa muutoksia, jotka voivat altistaa uusille taudinaiheuttajille. Metsänterveyden tarkkaileminen on siksi tärkeää, että taudinaiheuttajien leviämistä voidaan seurata ja ehkäistä. Taudinaiheuttajien tuoma rasitus puustossa on havaittavissa latvuston muutoksissa. (Smigaj, Gaulton, Barr & Suárez 2015, 349.)

Puu oireilee yhteyttävien solujen heikentymisenä pigmenteissä, neulaskatona ja vedenkulutuksen vähenemisenä. Puun ollessa rasittunut sen aineenvaihdunta häiriintyy. Kun puun vesitalous häiriintyy, se yrittää hillitä yhteyttämisen yhteydessä tapahtuvaa soluhengitystä sulkemalla ilmaraot lehdissään. Tämä puolustusreaktio auttaa vähentämään vedenkulutusta ja haitallisten mikrobien pääsyä kasvisoluihin, mutta myös heikentää yhteyttämistä. Tämä aiheuttaa lehdissä lämmön nousemista, mikä on havaittavissa infrapunakuvauksella. Nämä muutokset ovat havaittavissa infrapunakuvauksella jo paljon ennen kuin ihmissilmin nähtäviä muutoksia puussa on esillä. (Smigaj ym. 2015, 349.)

6 Miehittämättömiä ilma-aluksia koskeva lainsäädäntö

Suomessa miehittämättömiä ilma-aluksia koskeva lainsäädäntö pohjautuu ilmailulakiin (864/2014) 9, 57, 70 § ja Liikenteen turvallisuusviraston (Trafi) antamaan määräykseen

OPS M1-32 kauko-ohjatun ilma-aluksen ja lennokin lennättämisestä. Se mitä osia lainsäädännöstä noudatetaan, riippuu ilma-aluksen käyttötarkoituksesta. Miehittämättömät ilma-alukset luokitellaan käyttötarkoituksen perusteella kahteen luokkaan: kauko-ohjattuihin ilma-aluksiin ja lennokkeihin. Käyttötarkoituksen perusteella ilma-alusta kutsutaan lennokiksi, mikäli sitä käytetään harrastus- tai urheilutarkoituksessa. Muutoin sitä kutsutaan miehittämättömäksi ilma-alukseksi tai kauko-ohjatuksi ilma-alukseksi. (Trafi 2017a.) Lennokin lennättämisen lainsäädäntö on kevyempää ja vaatii vähemmän valmistelua.

Metsätaloudessa ilma-aluksia ei käytetä harrastus- tai urheilutarkoituksessa, joten metsätaloudessa käytetään nimitystä miehittämätön ilma-alus, jonka alakategoria on kauko-ohjattu ilma-alus. Metsätaloudessa täytyykin tällöin täyttää laajemmat vaatimukset kuin harrastekäytössä, joita ovat mm: toimijailmoitus, vastuuvakuutus, lentopäiväkirja ja mahdolliset toimintatapa kohtaiset turvallisuusarviointit sekä toimintaohjeistukset normaali- ja häiriötilanteille. (Trafi 2017b.)

Kauko-ohjatun ilma-aluksen käyttämiseen ei tarvita lentotyölupaa, mutta lennosta vastaavan on oltava vähintään 18-vuotias. (Trafi 2017c, 3). Lennokin käyttämiseen ei ole alaikärajaa. (Droneinfo 2017). Riippuu siis käyttötarkoituksesta, saako ilma-alusta ohjata alaikäinen.

Ennen kuin kauko-ohjattavaa ilma-alusta lennetään ensimmäisen kerran, on käyttäjän tehtävä Liikenteen turvallisuusvirastolle toimijailmoitus. Ilmoituksessa on oltava seuraavat tiedot:

- a) tiedot käyttäjästä
- b) tekniset perustiedot ilma-aluksesta
- c) toiminnan laatu ja laajuus
- d) tieto siitä, aiotaanko toimintaa harjoittaa asutuskeskuksen tiheästi asutulla alueella
- e) tieto siitä, aiotaanko toimintaa harjoittaa ulkosalle kokoontuneen väkijoukon yläpuolella. (Trafi 2017c, 3.)

Kauko-ohjatusta ilma-aluksesta on löydyttävä käyttäjän nimi ja yhteystiedot. Ne voi kiinnittää esimerkiksi tarralla. Lisäksi lennoista on tallennettava lentopäiväkirjaa, jota säilytetään kolmen vuoden ajan. Tietojen esitystapa on vapaasti valittavissa, kunhan siitä löytyy seuraavat tiedot:

- a) lennätysten päivämäärä
- b) lennätyspaikka
- c) ilma-aluksen päällikkö
- d) ilma-aluksen valmistaja ja malli
- e) lennätysten tai lennätysjärjelmän alkamis- ja päättymisaika
- f) onko kyseessä:
 - 1) suoraan näköyhteyteen perustuva toiminta (VLOS) vai
 - 2) suoran näköyhteyden ulkopuolella tapahtuva toiminta (BVLOS)
- g) lennätystehtävän luonne sekä maininta mahdollisesta kauko-ohjaustähystäjän käytöstä. (Trafi 2017c, 3-4.)

Lisäksi määrätään suurimmaksi sallituksi lentoonlähtömassaksi 25 kg, suurimmaksi lentokorkeudeksi 150 metriä maan tai veden pinnasta ja käytön tulee olla näköyhteyteen perustuvaa toimintaa. Näköyhteydestä voidaan joustaa käyttämällä kauko-ohjaustähystäjää, jolla on näköyhteys ilma-alukseen. Tähystäjällä ja käyttäjällä tulee olla käytössä luotettava viestintäväline, mikäli suora puheyhteys ei ole mahdollinen. Lentoaseman läheisyydessä on pidettävä vähintään viiden kilometrin etäisyys kiitotiehen ja lennettävä alle 50 metrin korkeudessa. Lentokentän läheisyydessä toiminnasta on neuvoteltava ilmailuliikennepalvelun tarjoajan kanssa, jos rajoista haluaa joustaa. Näihin määräyksiin on poikkeuksia esimerkiksi asutuskeskuksen tai ulkosalle kerääntyneen väkijoukon ylläpitämiseen. (Trafi 2017c, 4.) Niitä ei käsitellä tässä, koska ne eivät ole olennaisia metsätalouden toimijalle.

Metsätaloudessa voi tulla tarve lentää laajallakin alueella, jolloin näköyhteydestä ilma-alukseen voidaan joutua tinkimään. Näköyhteyden ulkopuolella tapahtuvaa lentotoimintaa saa kuitenkin tehdä vain tarkoitusta varten erikseen varatulla alueella. Tällöin on toiminnassa noudatettava seuraavia ehtoja:

- a) ilma-aluksen käyttäjä on laatinut aiotusta toiminnasta kirjallisen turvallisuusarvioinnin, joka sisältää vaaratekijöiden tunnistamisen, riskien arvioinnin ja riskien vähentämisen
- b) ilma-aluksen käyttäjä on laatinut kirjallisen toimintaohjeistuksen, joka sisältää kuvauksen normaalitoiminnasta sekä toiminnasta häiriötilanteissa

c) edellä a) ja b) kohdissa tarkoitetut asiakirjat säilytetään vähintään kolmen kuukauden ajan kyseisestä toiminnasta ja esitetään pyynnöstä valvontaviranomaiselle. (Trafi 2017c, 5.)

Metsätaloudessakin siis joudutaan pitämään näköyhteys ilma-alukseen jatkuvasti. Näihin määräyksiin voi kuitenkin hakea Liikenteen turvallisuusvirastolta poikkeusta vaatimuksista. Liikenteen turvallisuusvirasto voi myöntää poikkeuksia määräyksen OPS M1-32 vaatimuksista tilapäisesti testaus- ja tutkimustoimintaan, mikäli poikkeukset eivät vaaranna turvallisuutta. Koska metsien inventoinnissa useimmiten ollaan syrjässä ihmisistä ja taajama-alueista, voidaan olettaa, että poikkeuksien saaminen on mahdollista. Poikkeusta hakiessaan hakijan on esitettävä:

a) kirjallinen turvallisuusarviointi, joka sisältää vaaratekijöiden tunnistamisen, riskien arvioinnin ja riskien vähentämisen

b) Liikenteen turvallisuusviraston pyytäessä kirjallinen toimintaohjeistus, joka sisältää kuvauksen normaalitoiminnasta sekä toiminnasta häiriötilanteissa. (Trafi 2017c, 7-8.)

7 Tutkimuksen tarkoitus

Miehittämättömien ilma-alusten käyttö lisääntyy harrastelijoiden keskuudessa nopeasti, mikä laskee ilma-alusten hintaa alaspäin. Myös metsätaloudessa ilma-alusten hyödyt on ymmärretty jo varhain, ja tutkimusta aiheesta löytyy jo runsaasti. Suomessa taimikoita ei hoideta niin paljon kuin niitä pitäisi. Tämän opinnäytetyön tarkoitus oli tutkia, soveltuuko tutkittava menetelmä jollakin tapaa taimikon inventointiin tai taimikon tiheyden tulkitsemiseen.

Tutkimuksen lähtökohta oli se, että Suomessa on taimikonhoitorästejä. Toisin sanoen kasvavia taimikoita ei hoideta ajallaan, vaan kasvatettavaa puustoa haittaava muu puusto ja kasvillisuus alkavat haitata kasvuedellytyksiä. Jotta taimikoita hoidettaisiin paremmin, tarvitaan helpommin ja nopeammin tietoa taimikoista. Tutkimus lähti siitä, että metsäasiantuntija voisi käyttää vastaavaa automaattisempaa ja tuotteistetumpaa menetelmää arvioidessaan taimikoita.

Kyseessä oli menetelmätestaus, jossa testattiin menetelmän toimivuutta eri parametreilla. Työssä testattiin eri lentokorkeuksia, kuvausparametreja, työaikameneä jne. Työn tarkoitus oli myös tutkimuksessa käytettävien ohjelmien ja työnkulun testaaminen.

8 Tutkimuksen toteutus

8.1 Opinnäytetyön menetelmälliset valinnat

Kuvauskohterin sensorina käytettiin lähi-infrapunasäteilyä mittaava kameraa, joka erottaa hyvin lehtipuuston havupuuston seasta. Useimmiten taimikoista poistetaan havupuustoa haittaavaa lehtipuustoa. Lehtipuusta erottuu lähi-infrapunakuvasta, mutta tutkimuksessa luotiin lähi-infrapunakuvista NDVI, josta erottuu ainoastaan vihreän kasvillisuuden määrä. Lehtipuuston erottuminen ei siis ollut tärkeää tässä tutkimuksessa. Kerätystä kuvamateriaalista olisi myös ollut mahdollista tuottaa väärävärivärikuvia (kuva 1), joista lehtipuusto olisi voitu silmämääräisesti havaita havupuuston seasta. Väärävärivärikuvia ei tuotettu, eikä siten tutkittukaan tässä opinnäytetyössä.

Kerätty kuvamateriaali tarkasteltiin visuaalisesti. Kuvista pyrittiin selvittämään, missä kohdissa taimikkoa oli tiheintä. Voitiin olettaa, että taimikoissa, joissa osa puustosta kasvaa karummalla ja osa ravinteikkaammalla maalla tai kasvuolosuhteet ovat muuten vaihtelevat, taimikon tiheys ei olisi tasaista. Tällöin taimikonhoitotarvetta ei välttämättä olisi koko kuvion alueella. Ilmasta käsin on tehokasta tarkastella taimikonhoitotarvetta. Lähi-infrapunakuvista tuotetusta materiaalista metsäasiantuntija näkisi hoitotarpeen sijainnin ja määrän tarkasti, ja voisi suunnitella hoitotoimenpiteisiin tarvittavat resurssit tarkemmin.

Tutkimusaineisto hankittiin kesällä Metsänhoitoyhdistys Ylä-Kainuun avustuksella. Metsänhoitoyhdistys etsi sopivat tutkimusalueet, jotka sijaitsevat Hyrynsalmella. Kohteiden tuli olla lähellä toisiaan ja helposti saavutettavissa. Kohteiksi valikoitui männyn kylvetty ja kuusen istutettu taimikko. Näin pyrittiin vertailla myös eri viljelymenetelmien vaikutusta tuloksiin. Metsänhoitoyhdistys oli yhteydessä metsänomistajiin ja tutkimusta tehtiin heidän suostumuksellaan.

8.2 Kuvauskooperi DJI Phantom 4

Tässä tutkimuksessa käytettiin Karelia-ammattikorkeakoulun DJI Phantom 4 -kuvauskooperia. Phantom 4 on neliroottorinen kauko-ohjattava miehittämätön ilma-alus. Kooperiin voi kiinnittää erilaisia sensoreita, joita käytetään metsien kaukokartoitukseen. Phantom 4 käyttö metsätalouden kaukokartoituksessa on mahdollista sen automaattisten toimintojen ansiosta. Kuvauskooperiin voidaan ohjelmoida ennalta suunniteltu lentoreitti, jonka se lentää automaattisesti käyttäen GPS-paikannusta. Myös kuvaaminen on automaattista ja kuvauskohdat voidaan määrittää etukäteen. Phantom 4 käyttää sensoreita esteiden havaitsemiseen lentopolulla ja muuttaa automaattisesti lentorataansa törmäyksen estämiseksi. Tämä estää vaaratilanteita ja laitteiston vahingoittumisen. Laitteessa on myös kotiinpaluu-toiminto. Mikäli laitteen ohjaaja menettää hallinnan, eikä tiedä missä laite on, voidaan laite ohjata takaisin lähtöpisteeseen automaattisesti yhden napin painalluksella. (DJI 2017a.)

Kuvauskooperin ominaisuudet (taulukko 1) rajoittavat käyttöä metsätaloudessa. Laitetta ei voi käyttää suomen lainsäädännön vaatiman näköyhteyden vuoksi sellaisissa sääolosuhteissa, joissa näkyväisyys heikkenee. Ympäristön lämpötilarajoitukset rajaavat laitteen käytön lähinnä kesäaikaan ja poutasäähän.

Taulukko 1. DJI Phantom 4 tekniset tiedot. (DJI 2017b, 60).

Paino	1380 g
Suurin laskeutumisnopeus	6 m/s (21,6 km/h)
Suurin nousunopeus	4 m/s (14,4 km/h)
Suurin etenemisnopeus	20 m/s (72 km/h)
Suurin lentokorkeus merenpinnasta	19685 jalkaa (6000 m)
Ohjelmiston lentokorkeusrajoitus lähtöpisteestä	400 jalkaa (122 m)
Lentoaika	noin 28 minuuttia
Käyttölämpötila	0–40 °C
Satelliittijärjestelmä	GPS/GLONASS

Ohjaimen signaalin kantomatka

CE: 3.5 km, FCC: 5 km (testiympäristö)

8.3 RGB-kamera

Phantom 4 kopterissa on ihmissilmälle näkyvää valon aallonpituutta mittaava RGB-sensori (taulukko 2). Sensorilla voi kuvata korkearesoluutioisia kuvia ja videota. Sensori on kiinnitetty kopteriin kolmiakselisella gimbal-kuvanvakaajalla, jolla sensoria saadaan vakauteen kopterin liikkeestä aiheutuvasta värinästä ja heilunnasta. (DJI 2017a.)

Taulukko 2. DJI Phantom 4 kameran tekniset tiedot. (DJI 2017b, 60-61).

Sensori	1/2.3" 12MP
Linssi	FOV 94° 20 mm (35 mm format equivalent) f/2.8 (focus at infinity)
ISO käyttöalue	100–3200 (video) 100–1600 (kuva)
Elektronisen suljimen nopeus	8 s – 1/8000 s
Kuvan suurin koko	4000*3000
Kuvaustilat	Single shot Burst (3/5/7 kuvaa) Auto Exposure Bracketing (AEB) 3/5 Bracketed frames at 0.7 EV Bias Time Lapse HDR
Videokuvaustilat	4K: 4096x2160 (24/25) 4K: 3840x2160 (24/25/30) 2.7K: 2704x1520 (24/25/30) FHD: 1920x1080 (24/25/30/48/50/60/120) HD: 1280x720 (24/25/30/48/50/60)
Suurin bittinopeus (video)	60 Mbps
Tuetut tiedostomuodot	FAT32/exFAT Kuvat: JPEG, DNG (RAW) Video: MP4/MOV (MPEG-4 AVC/H.264)
Käyttölämpötila	0–40 °C

8.4 Sentera NDVI-sensori

Lähi-infrapunakuvausta varten Karelia-ammattikorkeakoulu hankki Sentera NDVI Single Sensorin (taulukko 3). Sensori tuottaa RGB-värikuvia ja lähi-infrapunakuvia, joista voidaan tuottaa normalisoitu kasvillisuusindeksi (NDVI). Senteran tuotteita markkinoidaan maatalouden, infrastruktuurin ja turvallisuuspalveluiden käyttöön. Senteran perustajajäsenen Emerickin (2017) mukaan, heillä ei ole kokemusta single sensorin käytöstä taimikon arvioinnissa. Todennäköisesti sensorin tuottaa kuitenkin hyvää ja tarkoituksenmukaista dataa.

Taulukko 3. Sentera NDVI Single Sensor tekniset tiedot. (Sentera 2017).

Sensori	1.2 MP CMOS with Global Shutter
Paino	30 g
Kuvaformaatti	JPEG, TIFF
Kuvataajuus	1.2 MP Stills: 15 fps 10.5 MP Stills: 3 fps (10.5 MP version) 720 p Video: 24 fps (10.5 MP version)
Keilanleveys	60° HFOV

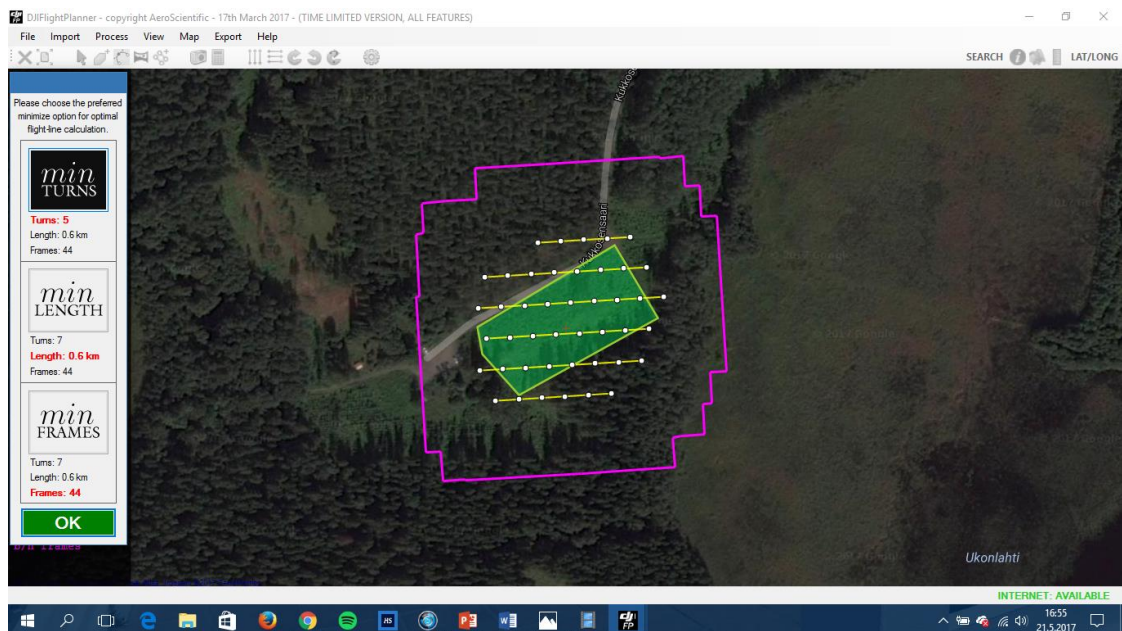
8.5 Lennon suunnittelu

Tutkimus lähti käyntiin kahden sopivan taimikon löydyttyä. Valituille tutkimusalueille tehtiin etukäteen lennon suunnittelu DJI Flight Planner -ohjelmistolla. Sen avulla saatiin valittua halutut parametrit tarkasti, jolloin myöhempi tuloksien tulkinta oli luotettavaa, koska tiedettiin, mitä parametrejä kulloinkin oli käytetty. Olennaisimpia muutettavia parametrejä olivat: kameran sensori, lentokorkeus, lentonopeus, etu- ja sivuttaispeitto, pikselin koko maanpinnalla, ja kuvanottotaajuus. Näin koko tutkittava alue saatiin kattavasti mitattua. (DJIFlightPlanner 2017.)

Ensin tutkimusalue digitoitiin piirtämällä polygoni kiinnostuksen kohteena olevan alueen päälle taustakartalta ja ilmakuvalta katsoen. Sitten valittiin käytettävä sensori ja alusta, jotka tässä tutkimuksessa olivat DJI Phantom 4 -kuvauksopteri ja Senteran NDVI-sensori. Päätettiin lennon parametrit, kuten lentokorkeus, kuvapeitto jne. Lentoratoja hienosäädettiin mahdollisimman taloudellisiksi tuottaen parhaimman kattavuuden ja turhat ehdotetut lentolinjat poistettiin tarvittaessa. Lentosuunnitelma siirrettiin siirtotiedostona tietokoneelta kuvauksopteriin. (DJIFlightPlanner 2017.)

Lentojen lentokorkeudeksi päätettiin valita 40 ja 80 metriä. Kuvapeitoksi valittiin yhteneväiset luvut sivuttais- ja pituuspeittoon, eli esimerkiksi 20 %:n sivuttaispeitto ja 20 %:n pituuspeitto. Eri kuvapeittoja valittiin 20 %:n lisäksi 40 %:n, 60 %:n ja 80 %:n peitoilla. Muut parametrit olivat lentosuunnitteluohjelman itse ehdottamia, kuten lentolinjat ja niiden suunta ja määrä. Yhteensä lentoja suunniteltiin siis 16 kappaletta.

Kuvan 2 alue on Joensuusta, jossa näkyy vihreällä polygonilla tutkittavaksi rajattu alue. Keltaiset viivat ovat ohjelman ehdottamia lentoratoja ja violetti uloin polygoni esittää alueen, jolta kuvamateriaali kerätään.



Kuva 2. Lennon suunnittelua DJI Flight Planner-ohjelmalla.

8.6 Lennon suorittaminen

Lennot suoritettiin ennalta tehdyn suunnitelman mukaisesti. DJI Phantom 4 -kuvauskopterin käyttäminen oli helppoa, sillä se toimii automaattisesti suunnitelman mukaan. Tutkimusalueen yli lennettiin useita lentoja, joista jokaisella oli erilaiset parametrit. Erilaisilla lennoilla pyrittiin selvittämään, mikä lentokorkeuden ja kuvapeiton yhdistelmä tuottaa parhaan ja kustannustehokkaimman tuotoksen. Lennot kestivät noin minuutista muutama minuuttiin. Lennot olivat siis tutkimuksen nopein osa.

Suomen lainsäädännön mukaan miehittämättömällä ilma-aluksella ei saa lentää yli 150 metrin korkeudessa ilman, että haetaan määräyksiin poikkeusta. Ilmatilan voi sulkea, mutta sitä tulee hakea etukäteen, jolloin se tulee hankalaksi. Useimmiten metsäasiantuntijalla ei ole aikaa hakea ilmatilan sulkemista ja siitä tulisi lisää työtä. Tarkoituksenmukaisempaa on tehdä mittaukset alle 150 metrin korkeudesta, jolloin mittauksia voi lähteä tekemään nopeastikin. Tämän takia tutkimuksessa lentokorkeus oli alle 150 metriä.

Lentoja suunniteltiin 16 kappaletta, mutta olosuhteet pakottivat rajoittamaan niiden määrää. Yhteensä lentoja tehtiin viisi kappaletta, joista kolme kuusen ja kaksi männyn taimikossa. Suurimpana esteenä useammalle lennolle oli lentokorkeus. Kaikki 40 metrin lentokorkeudelle suunnitellut lennot täytyi perua maaston runsaan korkeusvaihtelun vuoksi. Tutkimuksessa käytetty lentosovellus käyttää lentoa aloittaessaan lähtöpaikan tallennustoimintoa. Kun lento alkaa, laite nousee ennalta määrättyyn lentokorkeuteen ja aloittaa siirtymisen ensimmäiselle reittipisteelle, josta se aloittaa kuvauksen. Taimikoiden reunumetsä sijaitsee korkeammalla paikalla kuin lentoonlähtöpaikka, jolloin laitteen lentäessä lähtöpaikan kohdalta 40 metrin korkeudella alueen reunalla laite hipoi jo viereisen varttuneen metsän latvoja. Ohjelma ei siis muuttanut lentokorkeuttaan maanpinnan korkeusmallin mukaan, vaan piti lentokorkeuden samana suhteutettuna lähtöpisteeseen. Lennot 40 metrin korkeudelta peruttiin mahdottomana toteuttaa.

Toinen rajoittava tekijä oli akunkesto. Vaikka jäljelle jäi kahdeksan lentoa 80 metrin korkeudella, vain viisi lentoa suoritettiin. Jokaisen mittauslennon välissä laite palasi lähtöpisteeseensä ja muistikorteilta siirrettiin data tietokoneelle. Muistikortit tuli tyhjentää jokaisen lennon välissä, koska RGB-sensori tallentaa erillisten lentojen datan yhteenkansioon, jolloin lentojen data olisi voinut sekoittua. Lisäksi sää oli lentopäivänä tuulinen

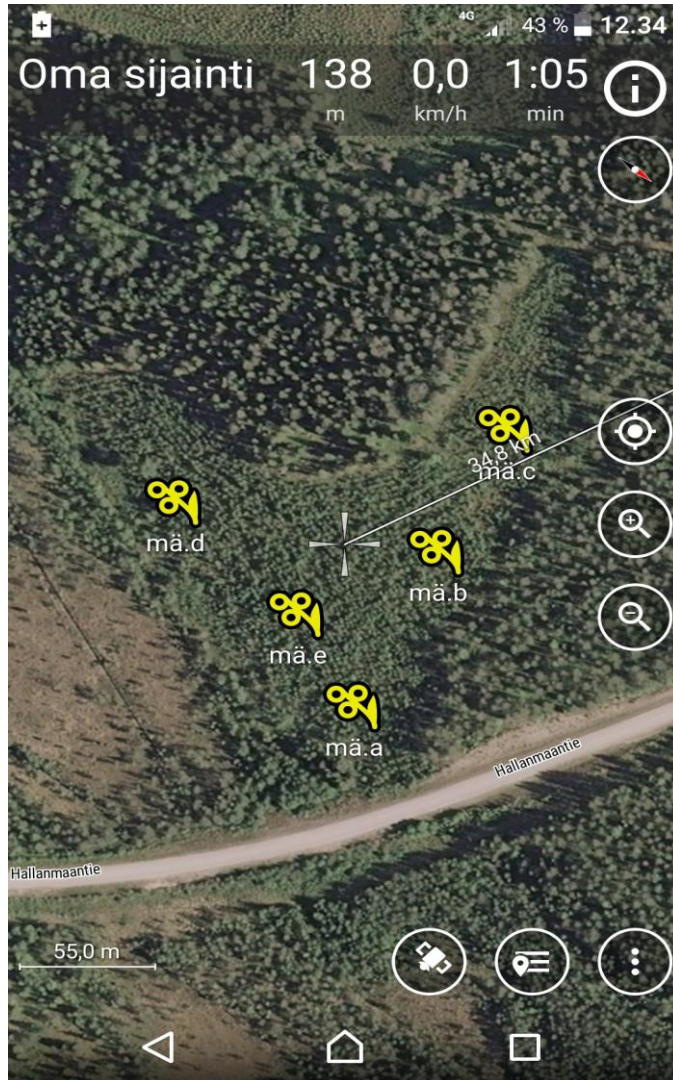
ja tämäkin osaltaan saattoi lisätä virrankulutusta. Käytössä oli kaksi täyteen ladattua akkua, ja enempää lentoja ei voitu turvallisesti suorittaa.

8.7 Vertailevat maastokoealat

Maastokoealojen avulla testattiin sitä, vastaako kuvalta tulkittuna arvioitu taimikontiheys todellisuutta. Maastokoealat sijoitettiin tasaisin välein kuvioille (kuva 3). Koealojen sijainti valittiin tavoitteena muodostaa riittävän kattava otanta. Koealan sijainti tallennettiin puhelimen paikannussovelluksen avulla pistetiedostoksi, johon saatiin WGS 84-koordinaatit. Taimikosta mitattiin maastossa 3,99 metrin vapaa käyttäen runkolukumäärät puulajeittain, läpimitta ja pituus.

Runkolukumäärät mitattiin käyttäen vapaa, mutta muut tunnuksat arvioitiin silmämääräisesti, kuten metsäasiantuntija tekisi työssään arvioidessaan taimikkoa. Vapaa käytettiin pituuden silmämääräisen arvioinnin tukena. Säteeltään 3,99 metrin vavalla mitattu ympyrä on pinta-alaltaan 50 neliometriä. Kertomalla koealalta laskettujen runkojen määrä muuntokertoimella 200, saadaan hehtaarikohtainen runkolukumäärä.

Koealojen sijainti tallennettiin puhelimen paikannussovelluksella ja puustotiedot kirjoitettiin ylös paperille. Myöhemmin puustotieto tallennettiin taulukkolaskentaohjelmaan.



Kuva 3. Koealojen sijainnit männyn taimikossa puhelimen paikkatieto-sovelluksessa.

8.8 Kuvamateriaalin käsittely ja tulkinta

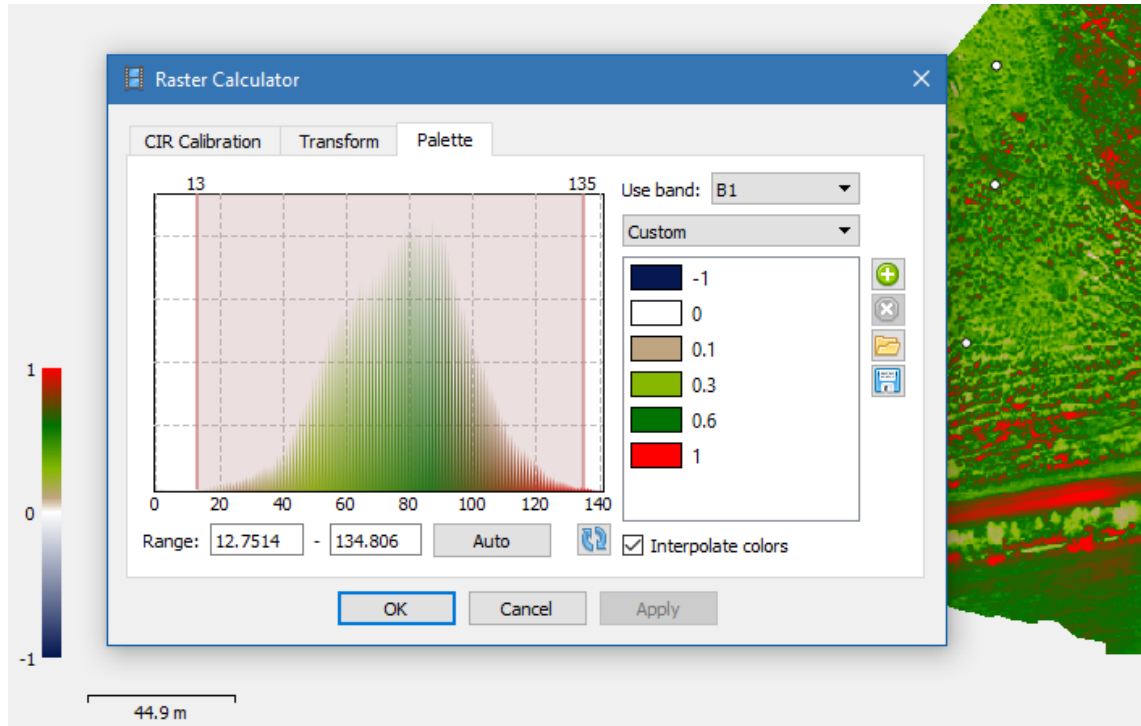
Lennoilta kerätty data orto-oikaistiin ortogonaaliprojektioon eli perspektiiviset vääristymät poistettiin. Sen jälkeen oikaistut kuvat yhdistettiin yhtenäiseksi mosaikoinnilla. Tähän käytettiin Agisoft Photoscan-sovellusta, joka tuottaa fotogrammetrista digitaalisten kuvien prosessointia ja luo kolmiulotteista spatiaalista dataa käytettäväksi paikkatietosovelluksiin ja visualisoitavaksi. (Agisoft 2017). Kuvista tuotettiin normalisoitu kasvillisuusindeksi, jota vertailtiin maastokoealojen tuloksiin.

Indeksin avulla pyrittiin määrittämään taimikon tiheimmät kohdat. Kuvalta tulkittiin silmänvaraisesti. Kuvia ei ollut tarpeen analysoida tarkemmin tilastollisesti, koska metsäasiantuntijan tavoitteet eivät sitä vaadi. Tähän tarkoitukseen ei tarvittu tarkkoja arvioita taimikon puulajisuhteista ja runkolukumääristä. Tehokkainta oli havaita kuvalta taimikon tiheys ja tiheyden vaihtelu kuviolla.

Kuvamateriaalin käsittelyssä meni aikaa muutamista kymmenistä minuuteista pariin tuntiin yhden lennon kohdalla. Viiden lennon kuvien käsittelyyn kului aikaa siis useita tunteja. Tietokoneen laskentateholla on iso vaikutus kuluvan ajan keston. Kuvankäsittely oli kuitenkin melkein kokonaan automaattinen prosessi, jossa käyttäjä käynnisti aina seuraavan vaiheen ja tietokone toimi siinä välissä itsenäisesti. Käyttäjän ei siis tarvinnut olla jatkuvasti läsnä.

9 Tutkimustulokset

Tutkimuksen tuloksia ovat NDVI-kuvat taimikoista. Jokaisesta kuvasta on nähtävissä vaihtelua taimikon tiheydessä, mikä ilmenee eri värisinä kohtina kuvassa. Eri kuvien välillä on nähtävissä eroja siinä, mitä värejä kuvaan saatiin. Kuvanmuokkausohjelma valitsi indeksin arvot väreille, jolloin kuvien välillä oli eroa siinä, mitkä kohdat taimikoista se laski tiheimmäksi. Siksi punaista väriä, joka ilmentää tiheimpiä kohtia, oli eri määriä eri kuvissa. Arvoja olisi pystynyt muuttamaan, jolloin punaista väriä olisi ollut enemmän tai vähemmän, riippuen tarpeesta. Tutkimuksessa päätettiin käyttää kuvanmuokkausohjelman automaattisesti valitsemia arvoja (kuva 4). Kaikissa tapauksissa tiheyden vaihtelu oli kuitenkin havaittavissa.



Kuva 4. NDVI:n värit määräytyivät kuvankäsittelyssä.

Vertailevilta maastokoealoilta saadut tiedot (liitteet 1 ja 2) taimikon runkolukumääristä koealoilla merkittiin kuviin. Esimerkiksi kuvassa 5 koealan A mittauspisteessä runkolukumäärä oli 10 400 runkoa hehtaarilla. Koealan merkinä käytettiin pistettä, joka tallennettiin puhelimen tallentamiin koordinaatteihin. Todellinen sijainti voi siis vaihdella joitakin metrejä puhelimen GPS-laitteen tarkkuudesta riippuen.

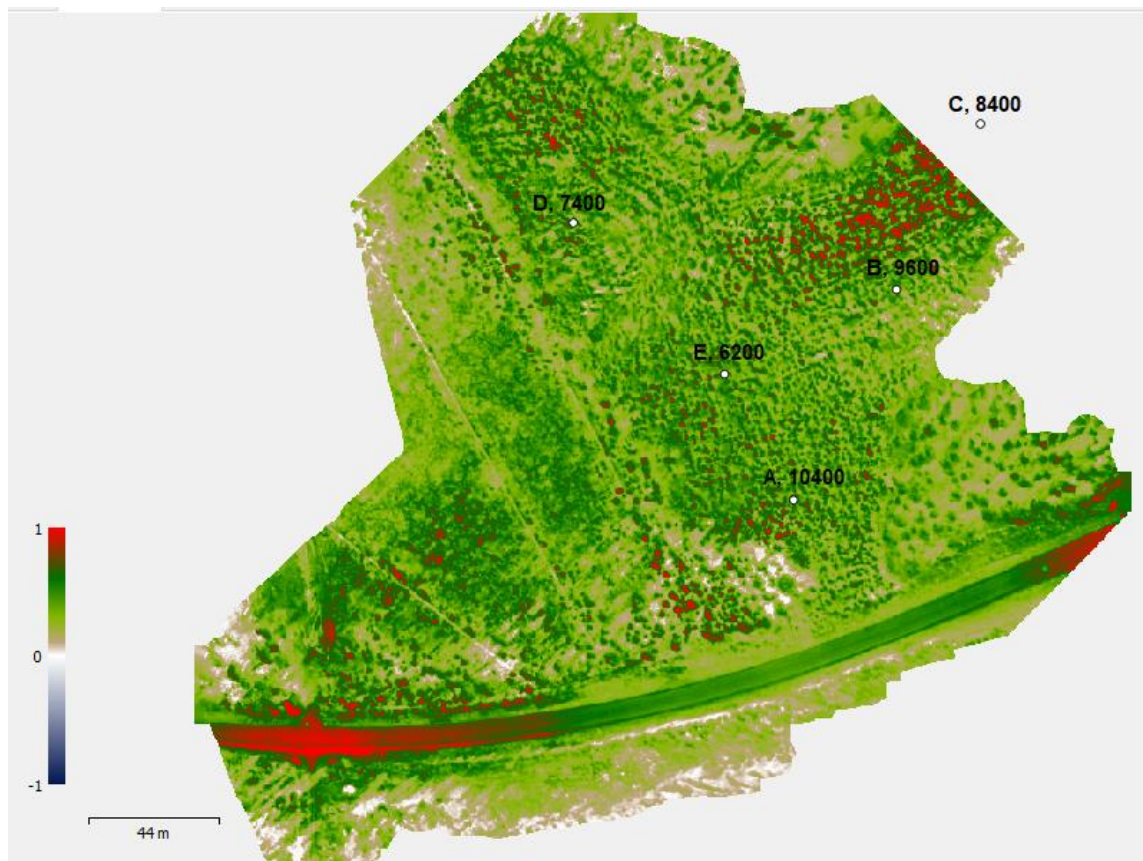
9.1 Männyn taimikon tulokset

Männyn taimikosta kuvattiin kaksi lentoa 80 metrin lentokorkeudesta. Toinen lento suoritettiin 20 %:n (kuva 5) ja toinen 60 %:n kuvapeitolla (kuva 6). Molemmat tuottivat NDVI:n, josta näkee vihreän kasvillisuuden määrän vaihtelun taimikossa.

Kuvassa 5, 20 %:n kuvapeitolla toteutettu lento ei luonut koko taimikon kattavaa kuvaa, jolloin NDVI ei ulotu koealalle C saakka. Kuvalta 5 tulkiten punaisin kohta ei ollut tiheimässä kohdassa kuviota, vaan siellä, missä puusto oli matalampaa ja hoikempaa (taulukko 4). Harvin koeala E ei erotu kuvalta juurikaan.

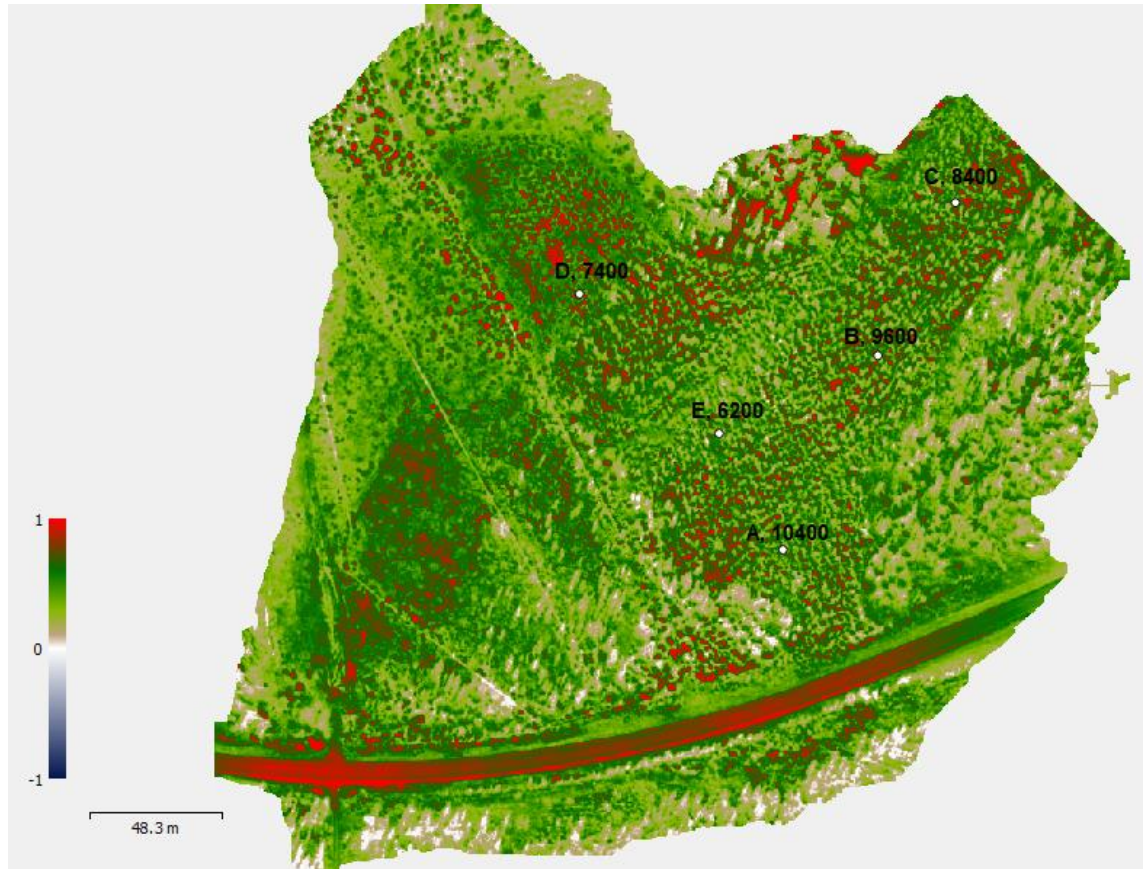
Taulukko 4. Männyn taimikon puustotiedot koelaittain.

	Runko- luku	Pituus, (m)	Läpimitta, (cm)
A	10400	2,8	4,1
B	9600	2,5	3
C	8400	2,5	2,8
D	7400	2,6	2,9
E	6200	4,5	5



Kuva 5. NDVI männyn taimikosta 80 metrin lentokorkeudella ja 20 %:n kuvapeitolla.

Kuvassa 6, 60 %:n kuvapeitolla toteutettuna, punaista on tasaisemmin koko taimikon alueella. Harvin koeala E erottuu kohtana, jossa punaista on vähemmän ja vihreä on vaaleampaa. Koealalla E runkoluku oli alhaisin, mutta taimikko oli myös järeämpää. Koealat A, B, ja C näyttävät yhteneväisiltä ja niihin verrattuna koeala D erottuu hieman enemmän tumman vihreänä kuin muut punaiset alueet.



Kuva 6. NDVI männyn taimikosta 80 metrin lentokorkeudella ja 60 %:n kuvapeitolla.

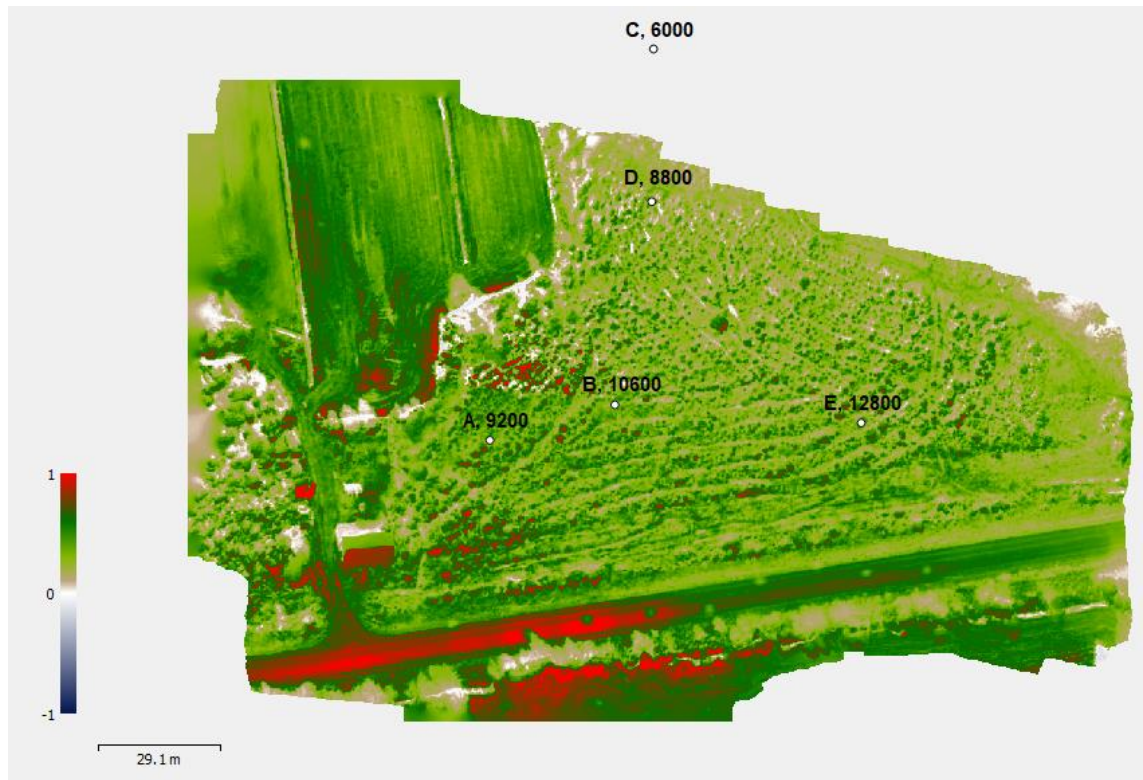
9.2 Kuusen taimikon tulokset

Kuusen taimikosta kuvattiin kolme lentoa 80 metrin lentokorkeudesta. Lennot suoritettiin 20 %:n (kuva 7), 40 %:n (kuva 8) ja 60 %:n kuvapeitolla (kuva 9). Jokainen lento tuotti NDVI:n, josta näkee vihreän kasvillisuuden määrän vaihtelun taimikossa. Kuvissa oli eroja indeksin luomien värien suhteen, mutta tulokset olivat samansuuntaisia. Taimikon tiheys kasvoi ylhäältä alas mennessä (taulukko 5).

Taulukko 5. Kuusen taimikon puustotiedot koealoittain.

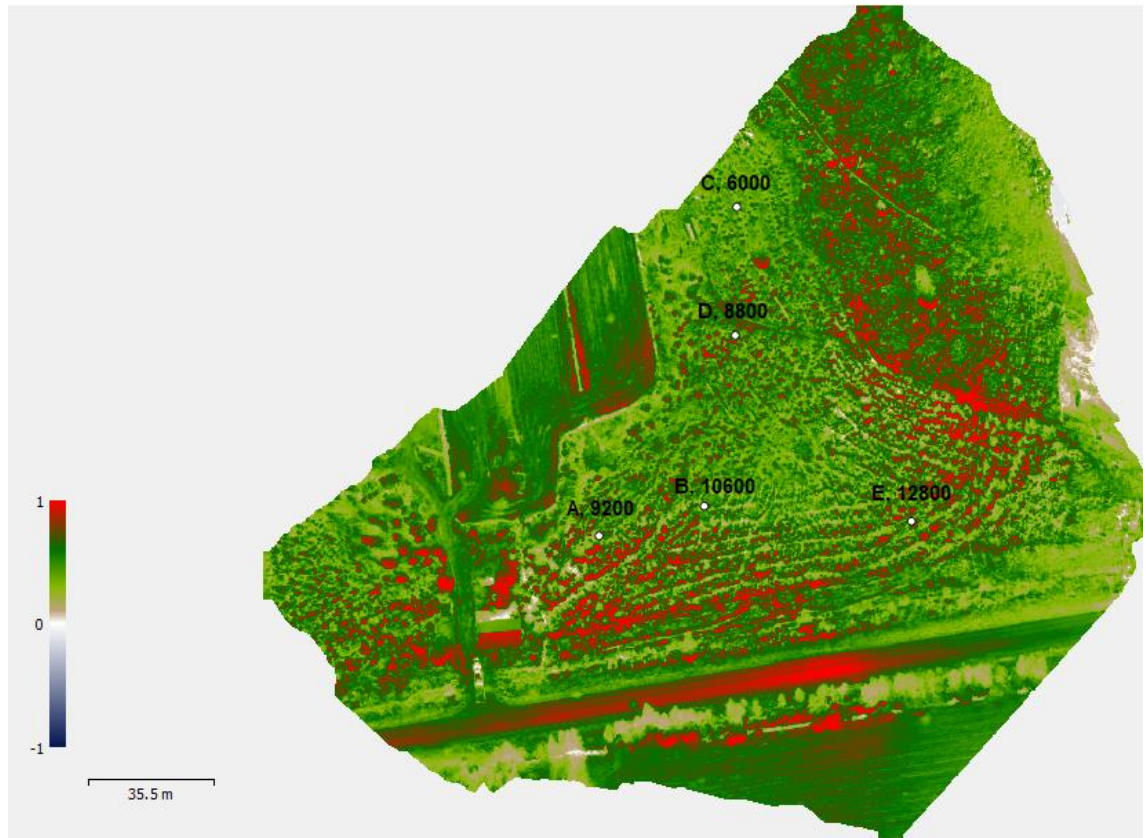
	Runko- luku	Pituus, (m)	Läpimitta, (cm)
A	9200	2,3	3,3
B	10600	2,1	2,5
C	6000	1,8	1,7
D	8800	2,3	2,5
E	12800	1,8	1,7

Kuvassa 7, 20 %:n kuvapeitolla toteutettu lento ei luonut koko taimikon kattavaa kuvaa, jolloin NDVI ei ulotu koealalle C saakka. Vaikka punaista väriä on kuvalla vähän, on vihreän sävy tummempaa kuvion alaosassa kuin yläosassa. Koealojen runkoluvut ovat yhteneväiset indeksin värien kanssa. Männyn taimikossa 20 %:n kuvapeitolla indeksin korkein arvo ja punaisin väri tuli kohtaan, jossa puusto oli matalinta ja hoikinta. Kuusen taimikossa 20 %:n kuvapeitolla ei havaittu samaa. Kuusen taimikon hoikimmat ja matalimmat puustot olivat koealoilla C ja E. Runkoluvultaan ne ovat ääripäitä toisiinsa nähden.



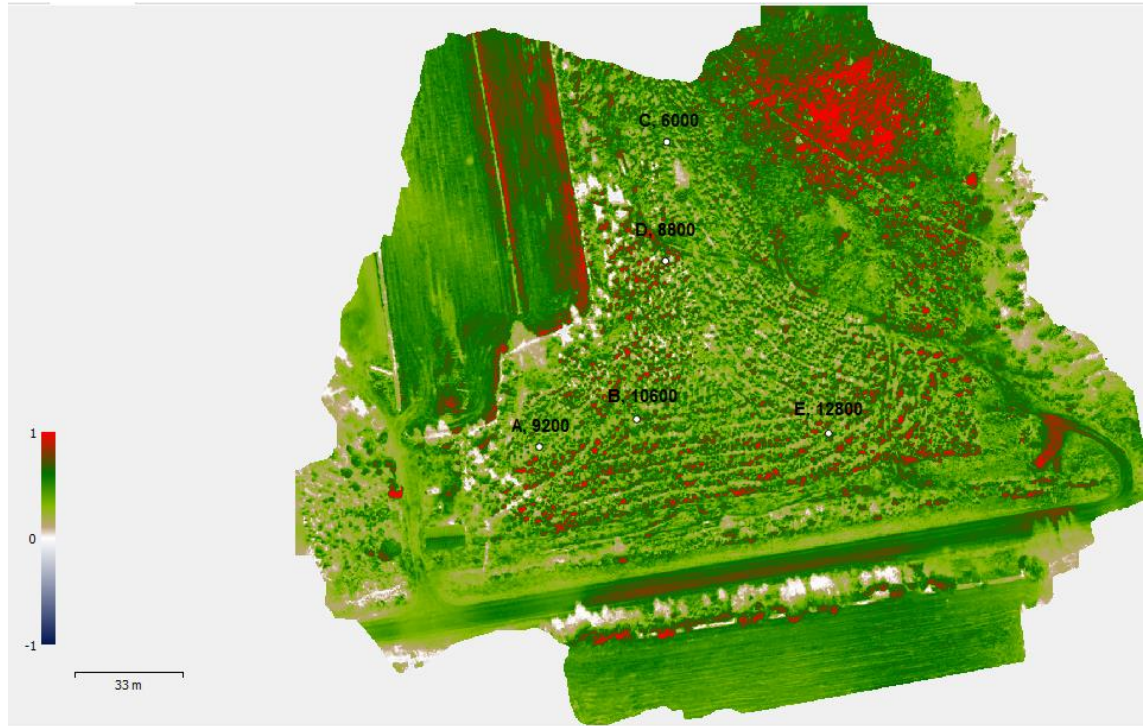
Kuva 7. NDVI kuusen taimikosta 80 metrin lentokorkeudella ja 20 %:n kuvapeitolla.

Kuvassa 8, 40 %:n kuvapeitolla toteutettu lento loi jo koko taimikon kattavan kuvan, jolloin kaikki koealat tulivat NDVI-kuvalle. Punaista väriä tuli eniten tälle kuvapeitolle kuusen taimikon lennoista. Harvin koeala C erottui kohtana, jossa punaista ei ole lainkaan. Muilla koealoilla indeksin värit olivat enemmän lähellä toisiaan, mutta punaisimmat kohdat löytyivät kuvion alaosista, joissa runkoluvutkin olivat korkeimmat. Valkoista väriä, joka kertoo vähäisestä määrästä vihreää kasvillisuutta, ei ollut nähtävissä tässä samalla tavalla kuin 20 %:n ja 60 %:n kuvapeitoilla.



Kuva 8. NDVI kuusen taimikosta 80 metrin lentokorkeudella ja 40 %:n kuvapeitolla.

Kuvassa 9, 60 %:n kuvapeitolla toteutettu lento loi myös koko taimikon kattavan kuvan, jolloin kaikki koealat tulivat NDVI-kuvalle. Punaista väriä tuli tälle kuvapeitolle samoilla kohdilla kuin 40 %:n kuvapeitolla, mutta hieman vähemmän. Harvin koeala C erottui edelleen kohtana, jossa punaista ei ollut. Muilla koealoilla indeksin värit olivat jälleen lähellä toisiaan. Tulokset olivat samansuuntaiset 40 %:n ja 60 %:n kuvapeitoilla, mutta 40 %:n kuvapeitolla erot olivat helpommin nähtävissä.



Kuva 9. NDVI kuusen taimikosta 80 metrin lentokorkeudella ja 60 %:n kuvapeitolla.

10 Pohdinta

10.1 Tulosten tarkastelu

Tutkimuksessa oli tarkoituksena testata monipuolisesti eri parametrien vaikutusta tuloksiin. Lentoja suunniteltiin 16 kappaletta, joista puolet jouduttiin karsimaan kun 40 metrin lentokorkeudella ei voinut suorittaa lentoja maastonkorkeuden vaihtelun vuoksi. Tästä syystä lentokorkeuden vaikutusta ei voitu arvioida tässä tutkimuksessa. Tutkimuksen kuvamateriaalin korkeusmalli saatiin rasteritiedostosta muokatulla vektorimuodolla, joka muutettiin hajapisteistöksi. Fotogrammetrian ja kaukokartoitusseuran (2005, 26.) mukaan korkeusmallilla on olennainen vaikutus ortokuvan geometriseen tarkkuuteen, joten lentokorkeuden vaikutusta korkeusmalliin ei nyt voitu tutkia. Lentokorkeuden testaaminen olisi ollut tärkeää, koska Haggrén & Honkavaaran (2005, 1.) mukaan nadiirikuvauksessa tavoitellaan kapeaa kuvakulmaa, joka saadaan kuvaamalla korkeammalta. Voi olla, että matalammalta lentokorkeudelta kuvattuna mittakaavaerojen ja valaistuksen vaihtelevuus olisi kasvaessaan tuonut eroja tutkimustuloksiin. Lentokorkeudella ei olisi

välttämättä ollut kuitenkin tässä tutkimuksessa merkittävää roolia, sillä yhden kuvapikselin koko Senteran sensorilla 90 metrin lentokorkeudesta kuvattuna on noin 10 senttimetriä. Lentokorkeus vaikuttaa kuvan pikselikokoon ja siten tarkkuuteen. Matalammilla lentokorkeuksilla olisi lähinnä saatu enemmän yksityiskohtia näkyviin, mutta tutkimuksessa kuvan visuaalisessa tulkinnassa jo 80 metrin lentokorkeudesta tarkkuus oli riittävä.

Tutkimusta varten valmisteltiin lentoja 20 %:n, 40 %:n, 60 %:n ja 80 %:n kuvapeitoilla. Tuulisen sään ja tiedonkeruutavan vuoksi laitteen virrankulutus oli sen verran voimakasta, että virtaa ei riittänyt kaikkiin lentoihin. Männyn taimikossa lennettiin 20 %:n ja 60 %:n kuvapeitoilla ja kuusen taimikossa 20 %:n, 40 %:n ja 60 %:n kuvapeitoilla. Näin ollen yhtäkään lentoa ei lennety 80 %:n kuvapeitolla. Tutkimustuloksissa kuvapeitolla oli vaikutusta kuvatun alueen kattavuuteen. Vaikka jokainen lento suunniteltiin samalla rajauksella, matalimmilla kuvapeitoilla tuotetut kuvat eivät kattaneet koko taimikkoa. Mitä suurempi kuvapeitto, sitä varmempaa oli saada koko taimikko kuvaan.

Tämä tapahtui sen takia, että lennon suunnitteluvaiheessa valittiin käytettäväksi sensoriksi DJI Phantom 4 kopterin oma kamera. Näin tehtiin, vaikka tutkimuksessa tarkoitus oli käyttää Senteran sensorin ottamia kuvia. Silloin ei osattu ottaa huomioon sitä, että Senteran lähi-infrapunasensorissa oli eri polttoväli kuin DJI:ssä. Kun lento suunniteltiin DJI:n polttovälillä, joka on suurempi kuin Senteran polttoväli, vaikutti se siten, että pienellä kuvapeitolla koko aluetta ei saatu kuvattua. DJI Flight Planner-ohjelmaan olisi pitänyt luoda vaihtoehdoksi sensori Senteran tiedoilla, jolloin suunnitteluohjelma olisi tuottanut lennot, joilla samoja kattavuusongelmia ei olisi ollut pienillä kuvapeitoilla.

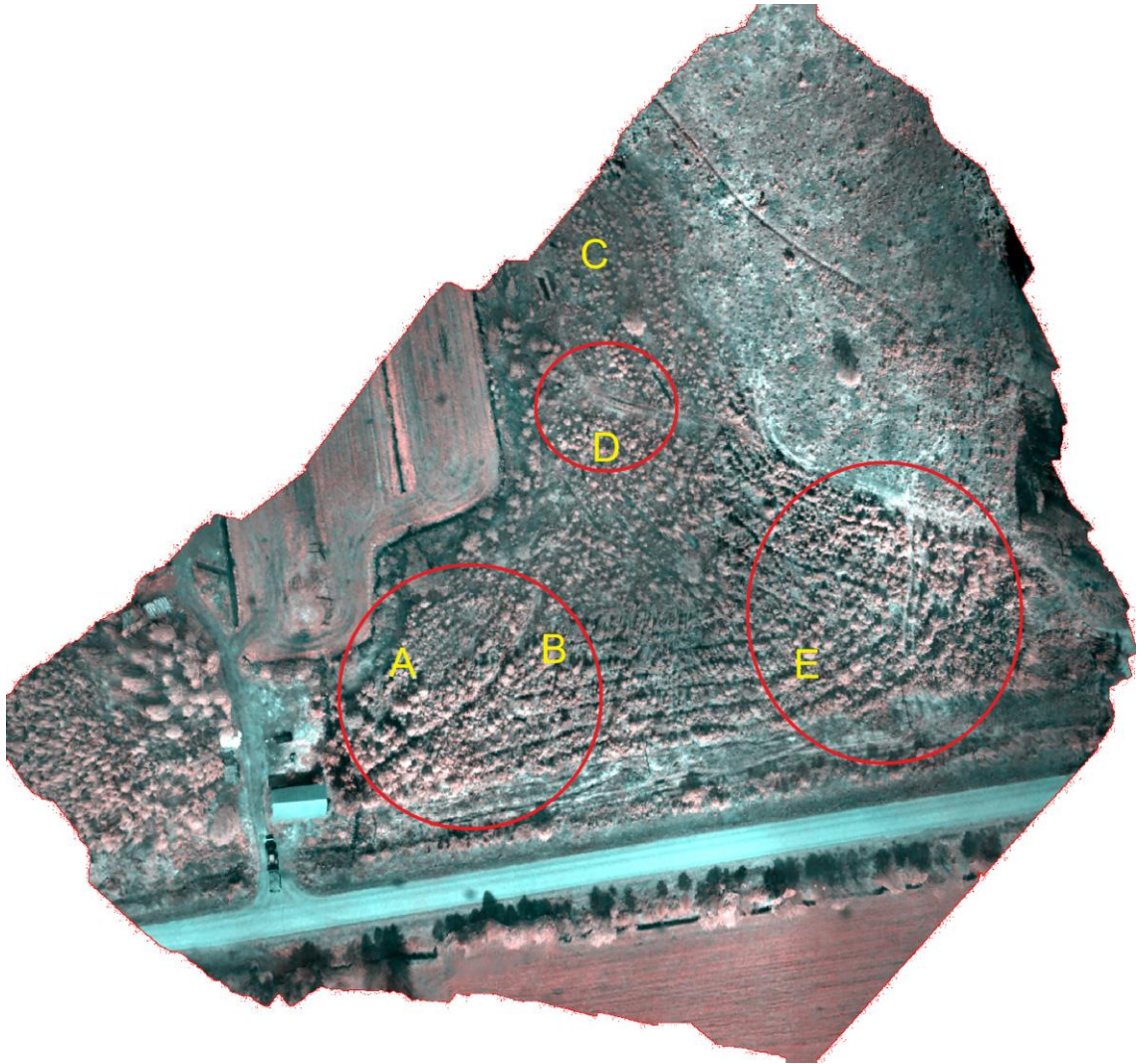
Männyn ja kuusen välillä oli eroa tulosten yhteneväisyydessä. Männyn taimikossa 20 %:n kuvapeitolla tihein kohta ei ollut siellä, missä se indeksin värin perusteella olisi pitänyt olla. Samalla harvin kohta ei erottunut niin selvästi kuin 60 %:n kuvapeitolla, jolla indeksin värit vastasivat muutoinkin paremmin todellisuutta. Kuusen taimikossa tulokset olivat yhteneväiset maastokoealoihin verrattuna jokaisella kuvapeitolla. Kuusen taimikon tulosten perusteella voidaan olettaa, että huolimatta siitä mikä kuvapeitto on, tulokset ovat samansuuntaisia. Koska suurempi kuvapeitto lisää datamäärää ja kuvaukseen kuluvaa aikaa, ei suurista kuvapeitoista tämän tutkimuksen perusteella ole merkittävää hyötyä. Tämän tutkimuksen perusteella ei voida kuitenkaan suositella pienimpiä mahdollisia kuvapeittoja, sillä nadiirikuvauksessa on tavoitteena kapea kuvakulma, johon päästään mm. suuremmilla malli- ja jonopeitoilla. (Haggrén & Honkavaara 2005, 1).

Yksi männyn ja kuusen taimikoiden välisiin eroihin johtaneita syitä saattoi olla säätila ja valaistus. Tutkimus suoritettiin kuusen taimikossa puolilta päivin puolipilvisessä säässä ja tuuli ei ollut voimakasta. Männyn taimikossa tutkimus suoritettiin iltapäivällä, jolloin sää oli muuttunut pilvisemmäksi ja tuuli oli voimistunut. Voi olla, että männyn taimikon tulokset eivät olleet yhtä yhteneväiset muuttuneiden sääolosuhteiden vuoksi. (Tuominen ym. 2015, 2–3). Tuuli saattoi vaikuttaa kuvauskulmiin ja valaistus saattoi olla epätasaista. Haggrén & Honkavaaran (2005, 1) tutkimuksissa on havaittu nadiirikuvauksessa tasaisen valaistuksen olevan tärkeää.

Ei voida luotettavasti todistaa minkään tutkimustuloksen johtuvan siitä, onko taimikko ollut kylvetty tai istutettu. Männyn kylvetyssä taimikossa pituusvaihtelua oli runsaammin kuin kuusen istutetussa taimikossa. Istutetussa taimikossa oli yllättäen runsaampia runkolukuja kuin kylvetyssä taimikossa. Tämä voi johtua rehevämmästä kasvupaikasta tai liiallisesta maanmuokkauksesta kuusikossa. Männyn taimikossa mäntyä oli kuviolla 3520 runkoa hehtaarilla ja kuusen taimikossa kuusia 2240 runkoa hehtaarilla. Lukemat ovat viljelymenetelmille tyypillisiä. Tutkimuksessa ei kuitenkaan löytynyt eroja viljelymenetelmien välillä siinä, miten taimikon tiheyden vaihtelu on havaittavissa NDVI-kuvalta.

Tutkimuksen perusteella voidaan olettaa, että käytettävä menetelmä sopii taimikon tiheyden ja sen vaihtelun arvioimiseen vain auttavasti. Tuotetuilta NDVI-kuvilta voi päätellä vihreän kasvillisuuden määrän vaihtelua. NDVI näyttääkin vihreän kasvillisuuden määrää, jolloin tulokset eivät suoranaisesti ole taimikon tiheydestä kertovia arvoja. NDVI havaitsee kaiken vihreän kasvillisuuden, kuten heinän ja saniaiset. Jos taimikko on harvaa, mutta heinää on runsaasti, indeksi näyttää silti siihen kohtaan suuria arvoja.

Koska huomattiin että NDVI ei voi olla luotettava menetelmä taimikon tiheyden arvioinnissa, jos tavoitteena on arvioida taimikonhoitotarvetta, tuotettiin kuusen 40 %:n kuva-peiton lennosta väärävärikuva. Väärävärikuvalta voitiin tulkita lehtipuuston osuus havu-puustoisesta taimikosta. Tuotetulta kuvalta (kuva 10) olikin helposti visuaalisesti tulkittavissa kohdat, jotka erottuivat kirkkaampana muusta taimikosta. Lisäksi lehtipuu-osuus kuusikon maastokoealoilta kerätyssä puustotiedossa (liite 2) oli suurempi niissä kohdissa, jotka erottuivat kuvallakin kirkkaampina. Vertailevat maastokoealat tukivat kuvalta visuaalisesti havaittuja ominaisuuksia.



Kuva 10. Vääräväriv kuvasta tulkittiin lehtipuutiheiköt.

On kuitenkin selvää, että sellaisenaan käytettynä menetelmä ei sovellu muuhun kuin tutkimustarkoituksiin. Pinta-alaltaan pienillä taimikoilla ei ole tarpeen tietää asioita, joita tällä menetelmällä voidaan selvittää. Mikäli taimikon koko olisi suuri, voisi siinä olla runsaammin sisäistä vaihtelua. Niissä tapauksissa menetelmä auttaisi löytämään toimenpiteitä vaativan kohteen ilman mittavaa maastoinventointia. Löydetylle kohteelle voitaisiin tehdä sitten täsmällisiä toimenpiteitä vähemmin kustannuksin.

Tässä käytettyjä menetelmiä käyttäen, tämä tutkimusmenetelmä on liian aikaa vievä metsäalan toimijoille. Menetelmä tulisi saada automaattiseksi. Mikäli inventointia tullaan suorittamaan tällä menetelmällä, tulee tuotettu data saada jalostettua siten, että siitä saadaan tuote, joka vähentää johonkin nykyisin käytettävään menetelmään käytettäviä resursseja.

10.2 Toteutuksen ja menetelmän tarkastelu

Lentojen suunnittelu lähti käyntiin heti kun toimeksiantaja oli toimittanut tiedot taimikoista. Lennot suunniteltiin valmiiksi etukäteen, jolloin suorittavaan vaiheeseen säästyisi mahdollisimman paljon aikaa. Suunnittelussa käytetty DJI Flight Planner-ohjelma oli helppo käyttää. Suunnitteluvaiheessa ei tiedetty sitä, että toteutuva lentokorkeus ei muutu maaston korkeusmallin mukaan. Osa lennoista jouduttiin perumaan, joten mikäli lentokorkeuden määräytymisperusteista olisi tiedetty, olisi lennot suoritettu korkeammalta. Tällöin olisi saatu testattua myös lentokorkeuden vaikutus tuloksiin.

Lentojen suunnitteluvaiheessa rajattiin tutkimusalue taimikoiden reunojen mukaan sovelluksessa olleiden ilmakuvien pohjalta. Lentojen suunnittelussa tehty virhe aiheutti sen, että vaikka rajaus oli sama jokaiselle lennolle, kaikki lennot eivät tuottaneet koko taimikkoa kattavaa ilmakuvaa. Joiltakin lennoilta ei saatu koko taimikkoa kattavaa NDV-kuvaa tämän takia.

Tutkimuksessa käytössä olleet laitteet ja sovellukset olivat toimivia ja niillä saatiin tuotettua sellaiset tulokset, jotka oli asetettu tavoitteeksi. Jotta tutkimus olisi saatu suoritettua kokonaisuudessaan kuten oli suunniteltu, olisi DJI Phantom 4:n virrankulutukseen pitänyt valmistautua paremmin. Akkuja olisi pitänyt olla enemmän tai lentoja olisi tullut suorittaa useana päivänä, jolloin akkuja olisi voinut ladata päivien välissä. Toteutuneen aikataulun vuoksi tutkimukset tuli tehdä yhden päivän aikana, joten tutkimus jäi näiltä osin vajaaksi.

Lentoja olisi voitu suorittaa useampi, jos lentojen dataa ei olisi jokaisen lennon jälkeen tarvinnut siirtää tietokoneelle. Siihen kului aikaa ja tutkimuslentojen väliin tuli siirtymislentoja, joilla laite siirtyi aloituspisteeseen. Näin tehtiin, jotta vältettäisiin tiedostojen sekoittuminen. Mikäli sovellus loisi oman kansion muistikortille jokaisesta lennosta, voisi useita tutkimuslentoja suorittaa ilman siirtymistä takaisin lähtöpisteeseen. Turhaa siirtymislentoa ei olisi.

Tutkimukseen valittiin taimikoita, joissa ei oltu tehty taimikonhoitoa. Jos tutkimukseen olisi otettu mukaan hoidettuja taimikkoja, olisi voitu vertailla hoidetun ja hoitamattoman taimikon eroavaisuuksia NDVI-kuvalla. Tämä vaihtoehto rajattiin tutkimuksesta kuitenkin ulos, jotta tutkimuksen työmäärä ei kasvaisi kohtuuttomaksi.

Vertailevat maastokoealat toimivat hyvin vertailupohjana NDVI-kuvien tarkastelussa. Vertailu olisi ollut tarkempaa, jos koealoja olisi otettu enemmän tai niiden sijainti olisi tallennettu tarkemmalla paikannuslaitteella kuin puhelimen GPS. Maastokoealojen avulla oli kuitenkin jo auttavasti mahdollista vertailla indeksin todenmukaisuutta.

Kuvankäsittely oli Agisoft Photoscan-sovelluksella helppoa, mutta ei kovin nopeaa. Kuvamateriaalin mosaikointi ja pistepilven muodostaminen veivät aikaa yhden kuvan kohdalla kymmeniä minuutteja. Kuvankäsittelyyn kuluva aika on riippuvainen tietokoneen laskentatehosta, joten kulloinkin saatavilla oleva laitteisto vaikuttaa ajankäyttöön. Lähi-infrapuna-ortokuvasta NDVI:n luominen on nopea prosessi. Agisoftissa on valmis työkalu indeksin luomiseen. Tuloksiin valittu väripaletti, jota osin muokattiin, on suoraan Agisoftista. Koska kuvankäsittely oli puoliautomaattinen prosessi, jossa käyttäjä käynnisti aina seuraavan vaiheen, kuvankäsittelyssä ei ole tutkijasta johtuvan virheen mahdollisuutta. Siitä syystä valittu kuvankäsittelymenetelmä sopi tähän tutkimukseen hyvin.

Väärävärikuva tehtiin ArcGIS-sovelluksella Agisoft Photoscan-sovelluksella tuotetusta lähi-infrapunamosaiikista. Tuloksena oli väärävärikuva, josta lehtipuustokeskittymät erottuivat hyvin. Senteran sensori tallentaa lähi-infrapun punaisen kanssa samalle kanavalle. Jotta väärävärivasta olisi saatu sellainen, johon on perinteisesti totuttu, olisi värikanavia pitänyt säätää. Siihen ei tässä kuitenkaan lähdetty, sillä kuva oli jo sellaisenaan hyvin tulkittavissa. Väärävärikuva toimii paremmin taimikonhoitotarpeen arvioinnissa kuin NDVI.

10.3 Eettisyyden ja luotettavuuden tarkastelu

Opinnäytetyön toteutus on tehty asianmukaisesti ja Karelia-ammattikorkeakoulun opinnäytetyöohjeen mukaisesti. Tutkimukseen lennoilla kerätty aineisto on kokonaan itseni tuottamaa ja siten vapaasti käytettävissäni. Metsänhoitoyhdistys Ylä-Kainuu hoiti yhteydenpidon tutkimuksessa käytettyjen taimikoiden metsänomistajiin, joilta oli suostumus tutkimuksen suorittamiselle heidän metsissään. Kuvaukset suoritettiin rajatulla alueella eikä kenenkään yksityisyyttä loukattu. Opinnäytetyö ei sisällä luottamuksellisia tietoja, liike- tai ammattisalaisuuksia, eikä sellaisia kerätty opinnäytetyötä varten.

Tutkimuksen päätelmät on tehty saatujen tulosten perusteella. Luotettavampien tulosten saamiseksi kaikkia suunniteltuja parametreja pitäisi päästä testaamaan. Taimikoita saisi

myös olla enemmän ja koealoja niillä runsaammin. Tuloksia voidaan kuitenkin pitää suuntaa antavina. Tutkimus on toistettavissa eri sijainneissa ja erilaisissa taimikoissa.

10.4 Jatkotutkimus- ja kehittämisideat

Tämän työn tulokset ovat laajasti hyödynnettävissä. Metsäala on ottamassa käyttöön miehittämättömiä ilma-aluksia ja mahdollisia käyttökohteita etsitään. Tämä tutkimus antaa näkökulmia siihen, miten lähi-infrapunakameralla tuotettu aineisto toimii taimikoissa. Myös metsäalan opetuksessa halutaan pysyä tässä mukana, ja tästä tutkimuksesta voidaan jatkojalostaa ideoita opinnäytetöihin tai koulutukseen.

Tämän tutkimuksen luontaisena jatkona olisi hyvä vertailla hoidetun ja hoitamattoman taimikon eroavaisuuksia, jolloin voitaisiin kenties löytää uusia menetelmiä taimikonhoitotarpeen arviointiin tai jopa toteutuneen taimikonhoidon työntäjien mittaamiseen. Tutkimusta voisi jatkaa keskittyen väärävärικuvien tulkintaan. Väärävärικuvista taimikonhoitotarpeen arvioiminen voisi olla lisätutkimuksen kohteena.

Lähi-infrapunakameraa voi käyttää muuhunkin kuin taimikon tutkimiseen, ja tämän tutkimuksen pohjalta voi pohtia, soveltuuko tässä käytetyt sovellukset tai menetelmät muihin tutkimuksiin. Jotta menetelmää hyödynnettäisiin, tulisi siitä kehittää tuote, joka tuo jotain uutta ja työtä tehostavaa taimikon inventointiin. Mahdollisia taimikoihin liittyviä jatkokehitysideoita ovat esimerkiksi taimikon terveyden arvioiminen metsätuhojen vähentämiseksi, taimikonhoidon työntäjien tarkastaminen, taimikonhoitotarpeen tutkiminen ja metsän viljelyssä onnistuminen.

Lähteet

- Aaltomuoto. 2017. Valo ja värit. Aaltomuoto. <https://aaltomuoto.wordpress.com/valo/nayttamovalaisun-perusteet/valo-ja-varit/>. 9.4.2017.
- Agisoft. 2017. Agisoft PhotoScan. Agisoft. <http://www.agisoft.com/>. 12.5.2017.
- DJI. 2017a. Phantom 4. DJI. <http://www.dji.com/phantom-4>. 11.5.2017.
- DJI. 2017b. Phantom 4 User Manual. DJI. <https://dl.djicdn.com/downloads/phantom-4/20170327/Phantom+4+User+Manual+v1.4.pdf>. 11.5.2017.
- DJIFlightPlanner. 2017. Plan. Tweak. Fly. DJI. <http://www.djiflightplanner.com/>. 12.5.2017.
- Droneinfo. 2017. Usein kysyttyä. Trafi. http://www.droneinfo.fi/fi/usein_kysyttya/lenno-kin_lennatys_24.4.2017.
- Earth Observatory. 2017. Measuring vegetation (NDVI & EVI). NASA. https://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation/measuring_vegetation_2.php. 11.9.2017.
- Emerick, G. 2017. Inquiry from Web. Jaakko.Moilanen@edu.karelia.fi. 12.5.2017.
- Fotogrammetrian ja kaukokartoituksen seura. 2005. Suositukset ortokuvien tuotannolle ja käytölle Suomessa, versio 6, 13.4.2005. 11.4.2017.
- Haggrén, H. & Honkavaara, E. 2005. Luento 7: Ortokuvien tuottaminen. Aalto yliopisto. https://foto.aalto.fi/opetus/220/luennot/7/L7_2005.pdf. 10.4.2017.
- Hua, L. & Shao, G. 2017. The progress of operational forest fire monitoring with infrared remote sensing. Teoksessa Journal of Forest Research (2017) 28(2). Springer. 215-229.
- Ilmatieteenlaitos. 2017. Metsä- ja maastopalot. Ilmatieteenlaitos. <http://ilmatieteenlaitos.fi/metsa-ja-maastopalot>. 28.4.2017.
- Kangas, A., Päivinen, R., Holopainen, M. & Maltamo, M. 2011. Metsän mittaus ja kartoitus. Silva Carelica 40. Jyväskylä: Kopijyvä Oy
- Mangold, K., Shaw, J. & Vollmer, M. 2013. The physics of near-infrared photography. European Journal of Physics 2013:34. <http://www.montana.edu/jshaw/documents/NIR%20Photography%20-%20Mangold%20et%20al%20-%20EJP2013.pdf>. 20.4.2017.
- Nielsen, M. 2004. True orthophoto generation. Technical University of Denmark. Informatics and Mathematical Modelling. Master thesis. http://www.sharpgis.net/projects/docs/imm-thesis-2004-50_web.pdf. 12.4.2017.
- Paikkatietoikkuna. 2017. Väärävärikuva. <https://kartta.paikkatietoikkuna.fi/#>. Maanmittauslaitos. 25.9.2017.
- Pukkala, T. 1988. Metsän kaukokartoituksen perusteet. Joensuu: Joensuun yliopiston monistuskasutuskeskus.
- Sentera. 2017. Sentera NDVI Single Sensor. Sentera. https://sentera.com/wp-content/uploads/2017/02/NDVI_Single_Sensor_New_Lit4056-WEB.pdf. 11.5.2017.
- Siegel, E. 2016. Mostly Mute Monday: New map of the Milky Way now complete!. Medium. <https://medium.com/starts-with-a-bang/mostly-mute-monday-new-map-of-the-milky-way-now-complete-da6c5ee4bd16>. 9.4.2017.
- Smigaj, M., Gaulton, R., Barr, S.L. & Suárez, J.C. 2015. Uav-borne thermal imaging for forest health monitoring: Detection of disease-induced canopy temperature increase. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-3/W3, 2015. 349-354.
- Statewide Mapping Advisory Committee. 2011. A Guide for Understanding, Interpreting and Benefiting from CIR Imagery. Aws.Amazon. <https://ncit.s3.amazonaws.com/s3fs-public/documents/files/Using-Color-Infrared-Imagery-20110810.pdf>. 21.9.2017.

- Thiel, C. & Schmullius, C. 2016. Comparison of UAV photograph-based and airborne lidar-based point clouds over forest from a forestry application perspective. *International Journal of Remote Sensing*, 38:8-10. 2411-2426.
- Tokola, T., Hyppänen, H., Miina, S., Vesa, L. & Anttila, P. 1998. Metsän kaukokartoitus. *Silva Carelica* 32. Saarijärvi: Gummerus Kirjapaino Oy
- Torresan, C., Berton, A., Carotenuto, F., Di Gennaro, S., Gioli, B., Matese, A., Miglietta, F., Vagnoli, C., Zaldei, A. & Wallace, L. 2016. Forestry applications of UAVs in Europe: a review. *International Journal of Remote Sensing*, 38:8-10. 2427-2447.
- Trafi. 2017a. Miehintämätön ilmailu. Trafi. https://www.trafi.fi/ilmailu/miehintamaton_ilmailu. 24.4.2017.
- Trafi. 2017b. RPAS lentotyötoiminta. Trafi. https://www.trafi.fi/ilmailu/miehintamaton_ilmailu/rpas_lentotyto. 24.4.2017.
- Trafi. 2017c. Kauko-ohjatun ilma-aluksen ja lennokin lennättäminen. Trafi. https://www.trafi.fi/file-bank/a/1482415412/c34a1bef37860a2559d61acf4fdebb3a/23514-OPS_M1-32_VALMIS_maarays_RPAS_fi.pdf. 24.4.2017.
- Tuominen, S. 2015. Miehintämättömät lentolaitteet (UAV) luonnonvarojen hallinnassa. Teoksessa Tuominen, S., Balazs, A., Saari, H., Pölönen, I., Sarkeala, J & Viitala, R (toim.). *Metsätieteen aikakauskirja*. Luke, 277-279.
- Tuominen, S., Balazs, A., Saari, H., Pölönen, I., Sarkeala, J & Viitala, R. 2015. Unmanned aerial system imagery and photogrammetric canopy height data in area-based estimation of forest variables. *Silva Fennica* vol 49 no. 5 article id 1348.
- Wikipedia. 2017. Infrared. Wikipedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/Infrared>. 20.4.2017.

Vertailevien maastokoealojen puustotiedot männyn taimikosta

	Mänty	Kuusi	Raudus- koivu	Hies- koivu	Pihlaja	Yhteensä	Keskiarvo
A Runkoluku	3200	1800	0	5400	0	10400	
Pituus, (m)	4	1,5	0	3	0		2,8333333
Läpimitta, (cm)	7	2	0	3,3	0		4,1
B Runkoluku	6000	400	0	3000	200	9600	
Pituus, (m)	4,5	1,5	0	3	1		2,5
Läpimitta, (cm)	7	2	0	2	1		3
C Runkoluku	3000	1800	0	3200	400	8400	
Pituus, (m)	4	1	0	4	1		2,5
Läpimitta, (cm)	6	1	0	3	1		2,75
D Runkoluku	1800	400	400	4800	0	7400	
Pituus, (m)	5	0,5	2	3	0		2,625
Läpimitta, (cm)	8	0,5	1	2	0		2,875
E Runkoluku	3600	0	0	2600	0	6200	
Pituus, (m)	5	0	0	4	0		4,5
Läpimitta, (cm)	6	0	0	4	0		5

Vertailevien maastokoealojen puustotiedot kuusen taimikosta

		Mänty	Kuusi	Raudus- koivu	Hies- koivu	Haapa	Pihlaja	Paju	Yhteensä	Keskiarvo
A	Runkoluku	800	2600	0	5800	0	0	0	9200	
	Pituus, (m)	2	3	0	2	0	0	0		2,333333
	Läpimitta, (cm)	3	5	0	2	0	0	0		3,333333
B	Runkoluku	1200	2600	0	6000	0	0	800	10600	
	Pituus, (m)	2	3	0	2	0	0	1,5		2,125
	Läpimitta, (cm)	3	5	0	1	0	0	1		2,5
C	Runkoluku	200	2200	0	3000	200	400	0	6000	
	Pituus, (m)	1	3	0	2	1	2	0		1,8
	Läpimitta, (cm)	0,5	4	0	1	1	2	0		1,7
D	Runkoluku	0	2600	400	5000	0	0	800	8800	
	Pituus, (m)	0	4	1	3	0	0	1		2,25
	Läpimitta, (cm)	0	6	1	2	0	0	1		2,5
E	Runkoluku	400	1200	200	7400	0	600	3000	12800	
	Pituus, (m)	1,5	2	1	2,5	0	2	2		1,833333
	Läpimitta, (cm)	2	4	1	1	0	1	1		1,666667