



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

KASVILLISUUDEN KAUKOKARTOITUS

Katriina Keto

YMPÄRISTÖTEKNIikka

Kandidaatintyö

Maaliskuu 2017



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

KASVILLISUUDEN KAUKOKARTOITUS

Katriina Keto

Ohjaaja: Anssi Rauhala

YMPÄRISTÖTEKNIikka

Kandidaatintyö

Maaliskuu 2017

TIIVISTELMÄ

OPINNÄYTETYÖSTÄ Oulun yliopisto Teknillinen tiedekunta

| | | | |
|--|-----------------------------|---|-----------------|
| Koulutusohjelma (kandidaatintyö, diplomityö) Ympäristötekniikan koulutusohjelma | | Pääaineopintojen ala (lisensiaatintyö) | |
| Tekijä Katriina Keto | | Työn ohjaaja yliopistolla Anssi Rauhala (DI) | |
| Työn nimi Kasvillisuuden kaukokartoitus | | | |
| Opintosuunta Vesi- ja yhdyksuntatekniikka | Työn laji Kandidaatintyö | Aika Maaliskuu 2017 | Sivumäärä 28 |
| <p>Tiivistelmä</p> <p>Kaukokartoitus on etämittausta, jossa informaatiota tutkitusta kohteesta saadaan ilman fyysistä kontaktia siihen. Esimerkiksi satelliitteihin, helikoptereihin ja miehittämättömiin lennokkeihin asennetut sensorit mahdollistavat laajojen alueiden tehokkaan kartoituksen. Niiden avulla pystytään tutkimaan myös kohteita, joissa in situ -menetelmät eivät ole mahdollisia esimerkiksi tutkitun alueen vaikeakulkuisuuden vuoksi. Aktiiviset kaukokartoituslaitteet sisältävät oman säteilylähteen, ja siten sekä lähettävät että vastaanottavat sähkömagneettista säteilyä. Passiivisissa kaukokartoitusmenetelmissä mitataan erillisestä säteilylähteestä (Auringosta) peräisin olevaa heijastunutta säteilyä. Sensorit vaihtelevat myös havainnoimiensa aallonpituuskaistojen lukumäärässä. Pankromaattiset sensorit mittaavat yhtä laajaa aallonpituuskaistaa ja tuottavat siten esimerkiksi mustavalkovalokuvia. Useampia rajattuja aallonpituuskaistoja samanaikaisesti mittaavilla laitteistoilla kyetään luomaan multi- ja hyperspektridataa. Onkin täysin tapauskohtaista, mikä sensori soveltuu parhaiten kartoittamaan tutkittua kohdetta.</p> <p>Useita kaukokartoitusmenetelmiä voidaan käyttää kasvillisuuden määrän ja laadun tutkimuksessa. Etenkin multi- ja hyperspektridata sisältää yksityiskohtaista informaatiota kartoitetun kasvipeitteen heijastusominaisuuksista. Dataa analysoimalla saadaan selville kasvilajeille ominaisia heijastusspektrejä. Kasvipeitteen heijastavuus riippuu kasvien kemiallisesta koostumuksesta, lehden morfologiasta sekä latvuston kolmiulotteisesta rakenteesta. Kasvilajien karakteristiset heijastusspektrit määritetään usein laboratorio-olosuhteissa, jotta kasvilajien tunnistaminen kaukokartoitusdatasta on mahdollista.</p> <p>Heijastusspektrien tuottaminen hyperspektridatan avulla vaatii kuitenkin paljon resursseja. Kasvillisuusindeksit ovat kasvillisuuden määrän ja laadun mittareita, joiden määrittämistä varten riittää muutaman oleellista informaatiota sisältävän aallonpituuskaistan mittaaminen. Niiden avulla kyetään arvioimaan kasvillisuuden elinvoimaisuutta sekä esimerkiksi seuraamaan kasvitautilien leviämistä. Laajimmin käytössä on normalisoitu kasvillisuusindeksi NDVI, joka vertaa punaisen valon aallonpituuskaistan ja lähi-infrapunakaistan heijastavuuksia. Kasvillisuusindeksejä kehitetään ja parannellaan jatkuvasti haluttujen ominaisuuksien tarkan ilmentämisen mahdollistamiseksi.</p> <p>Kasvillisuuden tutkimukseen sopivia kaukokartoitusmenetelmiä ovat myös muun muassa lidar eli lasermittaus sekä termisen infrapunasäteilyn mittaamiseen perustuva lämpökartoitus. Lidar on laajalti käytössä esimerkiksi metsien puiden korkeuden arvioinnissa ja latvuston rakenteen mallintamisessa. Infrapunasäteilyn emittoitumiseen perustuvat kasvillisuuden kaukokartoitusmenetelmät vaativat vielä lisätutkimuksia, mutta niiden avulla voidaan havaita esimerkiksi stressin aiheuttamat muutokset kasvien pintalämpötiloissa. Tässä kandidaatintyössä on esitelty tutkimustuloksia, joissa on arvioitu erilaisten kaukokartoitusmenetelmien soveltuvuutta kasvillisuuden määrän ja laadun monitoroinnissa.</p> | | | |
| Muita tietoja | | | |

ABSTRACT FOR THESIS

University of Oulu Faculty of Technology

| | | | |
|--|-------------------------------------|--|-----------------------|
| Degree Programme (Bachelor's Thesis, Master's Thesis) Degree Programme in Environmental Engineering | | Major Subject (Licentiate Thesis) | |
| Author Katriina Keto | | Thesis Supervisor Anssi Rauhala (M.Sc.) | |
| Title of Thesis Remote Sensing of Vegetation | | | |
| Major Subject Water and Geo Engineering | Type of Thesis Bachelor's Thesis | Submission Date March 2017 | Number of Pages 28 |
| <p>Abstract</p> <p>Remote sensing is a technique that acquires information from the studied surface without making physical contact with it. The used sensors can be mounted on different platforms, such as satellites, helicopters and unmanned aerial vehicles. This allows efficient mapping of large areas as well as areas that cannot be reached by foot and where, therefore, in situ experiments are not possible. Active remote sensing systems contain their own sources of radiation, whereas passive sensors measure the reflected radiation of a separate source (the Sun). The sensors used in remote sensing platforms can also be defined by the number of wavelength channels they measure. Panchromatic sensors measure one broad wavelength band and produce, for example, black and white photography. The systems that measure multiple discreet bands simultaneously can provide multi- and hyperspectral imagery. It is case-dependent which sensor and platform are best suited for mapping the studied object or phenomenon.</p> <p>Several remote sensing methods can be utilized in quantitative and qualitative vegetation mapping. Especially multi- and hyperspectral data include detailed information about the reflective properties of the mapped surface. Spectral reflectance curves, which are characteristic for different plant species, can be created by analyzing the acquired data. The reflectance of the vegetation cover depends on the chemical structure of the plants, the morphology of the leaves and the three-dimensional structure of the canopy. The reflectance curves of plants are often studied in laboratory, so that they can be compared to remote sensed data, which enables plant species identification.</p> <p>However, the generation process of spectral reflectance curves requires quite a lot of resources. Vegetation indices aim to evaluate the quantity and quality of vegetation cover by measuring the reflectance only on few wavelength bands, which include the relevant spectral information. Vegetation indices allow the monitoring of the health of plants and, for example, the spreading of plant diseases. The most used vegetation index is the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), which utilizes the reflectances of visible red light and near infrared radiation. Vegetation indices are constantly being improved so that they express the relevant quality or phenomenon in the best possible way.</p> <p>Other remote sensing methods that are suitable for vegetation mapping and monitoring are, for example, lidar and thermal imagery. Lidar is widely used to estimate the height of individual trees in a forest or revealing the structure of the forest canopy. Remote sensing techniques that are based on the emissivity of thermal infrared radiation still require further research. Though, these methods can be utilized in detecting changes in plant surface temperatures caused by plant stress. This Bachelor's thesis introduces some studies that have evaluated the suitability of different remote sensing methods in quantitative and qualitative vegetation mapping.</p> | | | |
| Additional Information | | | |

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

| | |
|---|----|
| 1 JOHDANTO | 6 |
| 2 KAUKOKARTOITUKSEN PERIAATTEET | 8 |
| 2.1 Kaukokartoituslaitteet | 8 |
| 2.2 Aineiston ominaisuudet ja käsittely | 9 |
| 3 KAUKOKARTOITUSMENETELMÄT KASVILLISUUDEN MONITOROINNISSA 11 | |
| 3.1 Kasvillisuuden heijastusspektrit | 12 |
| 3.2 Kasvillisuusindeksit | 14 |
| 3.3 Muut tekniikat | 17 |
| 4 KIRJALLISUUSKATSAUS KASVILLISUUDEN KAUKOKARTOITUSKOHTEISTA | 19 |
| 5 YHTEENVETO | 27 |
| LÄHTEET | 28 |

LIITTEET:

1 JOHDANTO

Kasvillisuuden elinvoimaisuus on indikaattori ympäristön tilasta, kuten pohjaveden laadusta, sillä kasvit ovat riippuvaisia elinympäristöstään. Kasvien ja ympäristön vuorovaikutussuhteiden ymmärtäminen vaatii tutkimusta sekä ekosysteemien rakenteesta, että kasvien toiminnasta. Ihminen muokkaa toiminnallaan, kuten ympäristön rakentamisella ja hiilidioksidipäästöillä, luonnollisia ekosysteemejä. Kasvillisuuden kartoitus ja seuranta ovat tärkeitä muun muassa näiden muutosten vaikutusten vakavuuden ymmärtämiseksi.

Kasvillisuuden määrää ja laatua voidaan tutkia käyttäen erilaisia in situ - tutkimusmenetelmiä, joista useat ovat destruktiivisia eli vaativat näytteen ottoa. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää ei-destruktiivisia menetelmiä, kuten ilmasta tai avaruudesta käsin tapahtuvaa kaukokartoitusta. Tätä etämittausten menetelmää voidaan käyttää esimerkiksi silloin kun fyysinen kontakti tutkimuskohteeseen ei ole mahdollinen. Kasvillisuuden kaukokartoitus kattaa kasvien havainnoinnin ja erilaisten parametrien mittauksen, mittaustulosten analysoinnin sekä kohteen seurannan ajan ja paikan suhteen. Erilaisten maan pinnalle, ilmakehään tai avaruuteen sijoitettujen sensoreiden ja kameroiden avulla voidaan tutkia sekä viljeltyä kasvillisuutta että luonnollisia ekosysteemejä.

Kaukokartoitustekniikoiden kehittyessä ja datan saatavuuden parantuessa viime vuosikymmeninä, kaukokartoituksesta on tullut yhä suositumpi menetelmä havainnoida ja tutkia ympäristöä. Se mahdollistaa laajojen alueiden tehokkaan mittauksen, ja jopa globaalit ilmiöt ovat havaittavissa Maata kiertävien satelliittien avulla. Kaukokartoitusdataa on saatavilla usean vuosikymmenen ajalta, mikä mahdollistaa myös kohteen vertailun menneisyyden ja nykyhetken välillä. Globaalien muutosten, kuten ilmastonmuutoksen, ympäristövaikutusten havainnointi onkin yksi tärkeistä kaukokartoitusmenetelmiä soveltavista tutkimusaloista.

Tämän kandidaatintyön tavoite on esitellä, millaisia kaukokartoitusmenetelmiä voidaan hyödyntää kasvillisuuden tutkimuksessa. Kandidaatintyön rajallisen pituuden vuoksi tässä työssä ei ole voitu esitellä kaikkia kyseiseen tarkoitukseen sopivia tekniikoita, ja valittujen menetelmien toimintaperiaatteisiin on voitu tutustua vain pääpiirteittäin. Kappaleessa 4 on kirjallisuuskatsauksena esitelty tutkimustuloksia erilaisten

kaukokartoitusmenetelmien käytöstä vaihtelevissa tutkimuskohteissa. Esimerkkitapaukset on valittu niin, että kyetään esittelemään mahdollisimman monta erilaista kaukokartoitusmenetelmää ja toisistaan eroavaa tutkimuskohdetta.

2 KAUKOKARTOITUKSEN PERIAATTEET

Kaukokartoituksella tarkoitetaan etämittausta, joka perustuu kohteen emittoiman tai kohteesta heijastuvan säteilyn mittaamiseen sekä analysointiin (Campbell 2002, s. 6). Kaukokartoituslaitteilla saadaan informaatiota tutkittavasta kohteesta ilman fyysistä kontaktia. Useimmat kaukokartoitustekniikat perustuvat sähkömagneettisen säteilyn lähettämiseen ja mittaukseen, mutta esimerkiksi ääniaaltoja hyödyntävä kaikuluotaus lasketaan myös joissain tapauksissa kaukokartoitusmenetelmäksi. Kaukokartoitusmenetelmiä voidaan soveltaa niin ilmakehän, vesistöjen kuin maanpinnankin, kuten myös ulkoavaruuden kohteiden tutkimuksessa. Tässä kandidaatintyössä kuitenkin keskitytään sähkömagneettista säteilyä käyttävien kaukokartoitusmenetelmien soveltamiseen Maan kasvipeitteen ominaisuuksien mittaamisessa.

2.1 Kaukokartoituslaitteet

Kaukokartoitusdataa saadaan joko maassa, ilmassa tai avaruudessa sijaitsevilta mittalaitteilta. Käytettävät kaukokartoituslaitteet, kuten kamerat ja erilaiset sensorit, voidaan sijoittaa esimerkiksi lentokoneisiin, miehittämättömiin lennokkeihin tai satelliitteihin. Pienlentokoneet, helikopterit ja miehittämättömät lennokit soveltuvat alueelliseen tutkimukseen, kun taas satelliitit mahdollistavat myös globaalien ilmiöiden havaitsemisen. Maata kiertävillä radoilla toimivat satelliitit keräävät dataa muun muassa sääilmiöiden ennustamista ja seuraamista varten, tiedustelu- ja vakoilutarkoituksiin, kuten myös kasvipeitteen tutkimukseen. Esimerkiksi yhdysvaltalaiset Landsat-satelliitit ovat tuottaneet kaukokartoitusdataa usean eri tieteenalan tutkimustarpeisiin 1970-luvulta lähtien (Xie ym. 2008).

Kaukokartoituslaitteissa käytettävät sensorit voidaan jaotella aktiivisiin ja passiivisiin niiden toimintaperiaatteen mukaan. Aktiiviset sensorit sekä lähettävät että vastaanottavat säteilyä, kun taas passiiviset sensorit eivät sisällä omaa säteilylähdettä. Passiivisesti toimivat sensorit mittaavat erillisestä säteilylähteestä, useimmiten Auringosta, peräisin olevaa maanpinnasta heijastunutta säteilyä. Kaukokartoituslaitteet voidaan jaotella myös niiden havainnoimien aallonpituuskaistojen määrän mukaan. Pankromaattiset sensorit mittaavat vain yhtä laajaa sähkömagneettisen säteilyn aallonpituuskaistaa ja tuottavat siten esimerkiksi mustavalkovalokuvia. Multi- ja

hyperspektrisensorit taas sisältävät useita aallonpituuskaistoja, joista jokainen vastaanottaa ja taltioi tiettyä diskreettiä aallonpituusaluetta. Multispektrisensorit keräävät dataa muutamilta suhteellisen leveiltä aallonpituuskaistoilta, mutta hyperspektrisensorit mahdollistavat jopa yli kahdensadan tarkkaan rajatun kapean aallonpituuskaistan erottamisen sekä taltioinnin, ja siten yksityiskohtaisen datan hankkimisen. Erot mitattavien aallonpituuskaistojen intensiteeteissä ovat avaintekijä heijastavan pinnan ominaisuuksien tunnistamisessa. Hyperspektrisensoreilla tuotettu kaukokartoitusaineisto sisältää yksityiskohtaista informaatiota kartoitetusta pinnasta, ja siksi sitä käytetään muun muassa kasvillisuuden tarkkaan kartoitukseen. (Campbell 2002 s. 64, s.292, s. 407; Xie ym. 2008)

2.2 Aineiston ominaisuudet ja käsittely

Kaukokartoituslaitteet tuottavat valokuvia tai digitaalista dataa, joka usein pyritään visualisoimaan erilaisten datankäsittelyohjelmistojen avulla. Nykypäivänä tuotetaan pääasiassa digitaalisia kaukokartoituskuvia, jotka koostuvat pikseleistä. Jokainen pikseli kuvaa yksinkertaistettuna tietyn kokoista maanpinnan aluetta ja sen mitattuja ominaisuuksia, kuten esimerkiksi kasvillisuuden määrää tai laatua. Tätä pikseliin verrattavaa pinta-alaa eli pinnan yksityiskohtien erottamiskykyä kutsutaan sensorin spatiaaliseksi resoluutioksi. Esimerkiksi jo toimintansa lopettaneet SPOT-1, -2 ja -3 -kaukokartoitussatelliittien HRV-instrumentit (High Resolution Visible) operoivat 20 metrin spatiaalisella resoluutiolla multispektraalisesti kolmella aallonpituuskaistalla. Sensoreille voidaan määrittää myös muita resoluutioita. Spektraalinen resoluutio ilmaisee kuinka monta eri aallonpituuskaistaa sensori mittaa, eli kuinka tarkasti se jaottelee vastaanotetun säteilyn sen aallonpituuden perusteella. Radiometrisellä resoluutiolla tarkoitetaan tasoja, joihin vastaanotetun signaalin intensiteetti jaotellaan. Esimerkiksi 8-bittisen järjestelmän tuottamassa kaukokartoituskuvasa voidaan havaita 256 eri kirkkausastetta tai väriä. Voidaan vielä määrittellä temporaalinen resoluutio, joka kuvaa sitä kuinka usein kartoitettavaa aluetta on mahdollista mitata käytetyllä laitteistolla, eli esimerkiksi satelliitin ylilennon säännöllisiä aikavälejä. (Lillesand ym. 2000, s. 417; Jones ym. 2010, s. 93–94)

Kaukokartoitusaineistossa esiintyy sekä systemaattisia että satunnaisia virheitä, jotka aiheutuvat käytetystä mittalaitteistosta ja mitatusta kohteesta. Ennen analysointia kaukokartoitusdataa tyypillisesti esikäsitellään esimerkiksi radiometrisesti ja

geometrisesti datan korjaamiseksi sekä tulkinnan helpottamiseksi. Kaukokartoituslaitteiden halutaan kasvillisuutta havainnoidessa kuvaavan maanpintaa ja latvustoa, mutta on huomioitava, että sähkömagneettisen säteilyn heijastumista, absorptiota sekä sirontaa tapahtuu myös ilmakehässä sensorin ja mittauskohteen välillä. Radiometrisen esikäsittelyn tarkoituksena on säätää pikselien kirkkausarvoja muun muassa näiden ilmakehän aiheuttamien vääristymien kompensoimiseksi ja interferenssin aiheuttaman kohinan minimoimiseksi. Kaukokartoituskuviissa esiintyy myös geometrisiä virheitä, jotka aiheutuvat esimerkiksi käytetyn sensorin asemasta ja kulmasta maanpintaan nähden, sekä maanpinnan korkeuseroista, ja niiden luomista varjoalueista käytettäessä passiivisesti toimivaa sensoria. Jos tiedossa on kartoitetun alueen topografiakartta, sitä voidaan soveltaa geometrisessä korjauksessa. Vääristymiä kaukokartoitussensoreiden tuottamiin kuviin aiheutuu myös Maan pyörimisestä, alustan liikkeestä ja mahdollisesta epästabiiliudesta, sekä kuvasuhteesta. Korjaamattoman kuvan neliön muotoinen pikseli voi kuvata todellisuudessa suorakulmion muotoista pinta-alaa, mikä saattaa johtaa virheisiin datan analysoinnissa. (Campbell 2002 s.17, s. 291–307; Jones ym. 2010, s. 129–138)

3 KAUKOKARTOITUSMENETELMÄT KASVILLISUUDEN MONITOROINNISSA

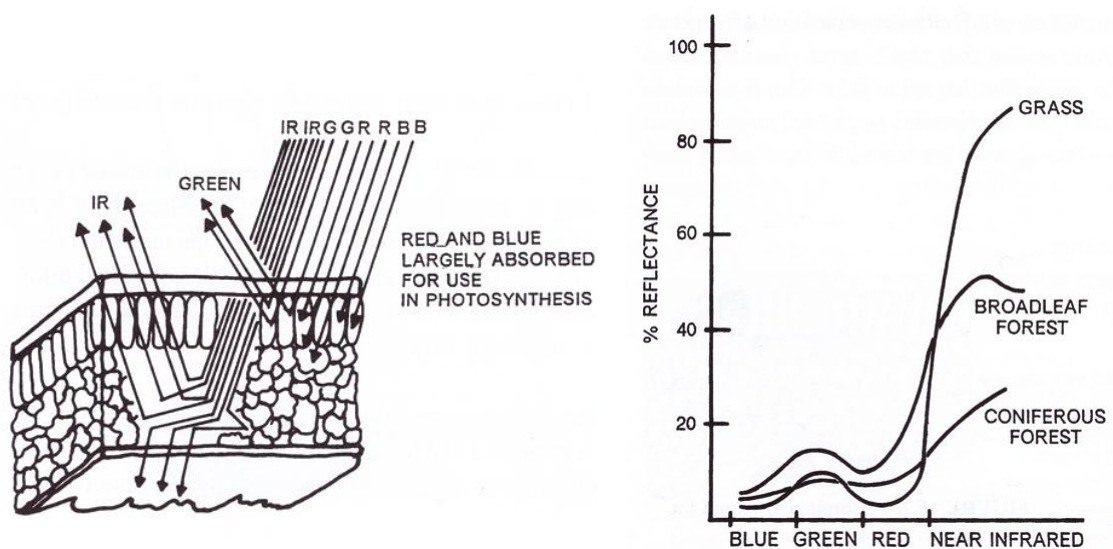
Kaukokartoitusmenetelmien avulla kyetään mittaamaan kasvillisuuden määrää ja laatua, sekä seuraamaan kasvipeitteen ominaisuuksien muutoksia ajan suhteen. Kasvillisuuden havainnointi ja luokitus kaukokartoitusdatasta perustuvat kasvipeitteen erottamiseen maanpinnasta ja vesistöistä, ja edelleen eri kasvillisuusluokkien sekä lajien jaotteluun kasvien karakterististen heijastusominaisuuksien perusteella. Etämittaus kaukokartoituslaitteiden avulla on sopiva tutkimusmenetelmä kartoittaessa kasvillisuutta, jonka sijainti ei ole fyysisesti saavutettavista, esimerkiksi maaston vaikeakulkuisuuden vuoksi. Kaukokartoitusmenetelmät myös mahdollistavat laajojen alueiden kustannustehokkaan tutkimuksen, joka olisi in situ -menetelmin toteutettaessa hyvin aikaa vievää.

Kaukokartoitusta voidaan hyödyntää niin viljellyn kasvillisuuden (Zhang ym. 2003) kuin luonnon ekosysteemienkin (Rosso ym. 2005) tutkimuksessa ja seurannassa. Se on tehokas työkalu maanviljelijöille ja metsänhoitajille laaja-alaisten viljelysmaiden ja metsien kartoituksessa, ja kaukokartoituksen ei-destruktiivisuus sekä kontaktittomuus ovat useissa tapauksissa eduksi. Kaukokartoitusmenetelmien avulla kyetään seuraamaan viljelysten kasvua tai niitä vaivaavien kasvitautien leviämistä, mutta ne myös mahdollistavat odottamattomienkin muutosten havaitsemisen (Xie ym. 2008). Muun muassa metsäkato ja sademetsien laittomat hakkuut havaitaan usein satelliittikuvista.

Kasvillisuuden kaukokartoituksen tavoitteena voi olla biomassan määrän estimointi, jolloin riittää erottaa kartoitetun alueen kasvillisuus taustasta. Usein tavoitteena on kuitenkin saada yksityiskohtaisempaa informaatiota kasvillisuuden määrästä ja laadusta, ja päämääränä voi olla esimerkiksi kasvillisuusluokkien, kuten metsä- tai suotyyppien, erottaminen toisistaan. Kasvilajien luokittelu vaatii usean aallonpituuskaistan mittaamista ja esimerkiksi hyperspektridatan analyysiä. Onkin siis täysin tapauskohtaista, millaista kaukokartoitusmenetelmää kannattaa käyttää kasvillisuuden tutkimuksessa. (Campbell 2002, s. 450)

3.1 Kasvillisuuden heijastusspektrit

Useimmat kaukokartoitusmenetelmät perustuvat sähkömagneettisen säteilyn heijastumiseen, joka taas riippuu heijastavan pinnan ominaisuuksista. Kasvillisuuden kaukokartoituksessa kiinnostuksen kohteena oleva pinta on useimmiten kasvin lehti, joka suurilta osin määrittelee koko tarkasteltavan kasvipeitteen heijastusominaisuudet latvuston muotojen ohella. Lehden heijastavuus riippuu muun muassa sen iästä, paksuudesta, vesipitoisuudesta sekä kemiallisesta koostumuksesta ja pigmentin jakautumisesta, kuten myös säteilyn tulokulmasta lehden pintaan nähden (Jones ym. 2010, s. 37). Koska kasvilajit eroavat toisistaan näissä rakenteellisissa ja kemiallisissa ominaisuuksissa, ne myös heijastavat säteilyä eri tavoin. Kasvillisuusluokille ja lajeille ominaiset heijastusspektrit mahdollistavat kasvien luokittelun ja tunnistamisen kaukokartoitusdatan avulla. Kuvassa 1 on vasemmalla esitetty miten näkyvän valon ja infrapunaa aallonpituusalueen sähkömagneettinen säteily heijastuu tyypillisen lehden pintarakenteessa. Kuvassa oikealla esitettyssä kuvaajassa nähdään eroavaisuudet kolmen kasvillisuusluokan heijastusspektreissä näkyvän valon ja lähi-infrapunaa aallonpituusalueella.



Kuva 1. Säteilyn heijastuminen lehden rakenteessa, ja kasvilajien eroavat heijastusspektrit (kuva: Campbell 2002)

Jotta ymmärrettäisiin, miten tietyille kasvilajille ominainen heijastusspektri syntyy, on tunnettava kyseisen kasvin lehden solutason rakenne. Kuten kuvasta 1 nähdään, tyypillisen lehden rakenteessa on erilaisista soluista koostuvia kerroksia. Lehden ylä- ja alapuolta peittävät ilmarakoja sisältävät pintasolut, joiden väliset solurakenteet

sisältävät viherhiukkasia. Suurin merkitys lehden heijastavuusominaisuuksiin näkyvän valon spektrissä on lehden kemiallisella koostumuksella, jossa eniten vaikuttavat fotosynteettiset pigmentit kuten klorofylli. Klorofyllimolekyylit absorboivat tehokkaasti valon sinisiä ja punaisia aallonpituuksia, mutta heijastavat vihreitä aallonpituuksia (Campbell 2002, s. 461), mikä nähdään kuvan 1 kasvillisuustyyppien ominaisheijastusspektreissä. Tästä johtuu useimmille kasveille ominainen vihreä väri. Vihreän valon heijastavuuden pieneneminen indikoi lehden klorofyllipitoisuuden alenemista ja voi aiheutua esimerkiksi vuodenajan vaihtumisesta tai ympäristön aiheuttamasta stressistä kasvissa. Klorofyllipitoisuuden pienentyessä sinisen ja vihreän aallonpituusalueen säteilyä absorboivien pigmenttien, kuten karoteenin, vaikutukset kasvin heijastusspektriin ovat selkeämmin havaittavissa. Tätä havaittua pigmenttikoostumusta voidaan käyttää tehokkaana työkaluna erottamaan kasvilajit toisistaan lehtien värin perusteella (Jones ym. 2010, s.40).

Elinvoimaisen kasvin heijastusspektriä ei määrittele ainoastaan näkyvän valon spektri, vaan reflektanssin maksimiavot havaitaan lähi-infrapuna-alueella. Kuvassa 1 on esitetty, miten lehden sisäiset rakenteet määrittelevät infrapun heijastuvuutta. Kasvin ikääntymisestä tai ympäristön olosuhteista aiheutuvat muutokset havaitaan tehokkaammin lähi-infrapuna-alueilla kuin näkyvän valon spektrissä (Campbell 2002, s.462). Lähi-infrapun aallonpituuskaistan heijastuvuutta sovelletaan tästä syystä laajalti kasvillisuuden kaukokartoituksessa.

Kasvin heijastusspektriin vaikuttaa kemiallisen koostumuksen ja fyysisen rakenteen ohella myös sen vesipitoisuus. Etenkin lyhytaaltoisen infrapunasäteilyn alueella vesi absorboi merkittävän osuuden tulevasta säteilystä, ja tyypillisesti kasvien heijastusspektrissä huomataan notkahdus näillä aallonpituusalueilla noin 1450 ja 1940 nanometrin kohdalla (Jones ym. 2010, s.164). Heijastavuuden pienenemisen voimakkuus on verrattavissa mitatun kohteen vesipitoisuuteen, ja siten heijastusspektriä voidaan soveltaa kasvien vesipitoisuuden estimointiin. Vesipitoisuuden merkittävä vaikutus kasvien heijastusspektreihin kuitenkin peittää alleen informaatiota kasvien useiden kemiallisten komponenttien, kuten typen, ligniinin ja selluloosan absorptio-ominaisuuksista (Fassnacht ym. 2016). Näiden komponenttien pitoisuuksien arviointi heijastusspektrien avulla vaatii siis kuivan näytteen, mikä ei useimmissa kasvillisuuden kaukokartoitustapauksissa ole mahdollista.

Yksittäisen lehden ja kaukokartoituskuvasa havaittavan latvuston heijastusominaisuudet kuitenkin eroavat toisistaan merkittävästi. Latvuston muodosta sekä rakenteesta johtuen säteily on vuorovaikutuksessa useiden eri kokoisten lehtien ja muiden kasvin rakenneosien kanssa, mikä johtaa monimutkaisempaan säteilyn absorptioon ja sirontaan kuin yhden lehden tapauksessa. Latvuston mitatut heijastavuusarvot ovat pienempiä kuin yksittäisen lehden reflektanssi muun muassa latvuston rakenteesta johtuvien varjoalueiden takia (Campbell 2002, s. 464). Tällaisten kolmiulotteisten rakenteiden mitattu heijastavuus on siis riippuvainen sekä säteilyn tulokulmasta, että siitä kulmasta, josta heijastunutta säteilyä mitataan (Jones ym. 2010, s. 37).

Kasveille ominaiset heijastusspektrit siis määrittelee niin kasvin kemiallinen koostumus, lehden morfologia kuin latvuston rakennekin. Jokainen näistä ominaisuuksista vaikuttaa omalla tavallaan kasville ominaiseen heijastusspektriin, jonka selvittäminen on työlästä vaatiessaan kattavan spektraalisen analyysin. Vaikka tämä kasvilajille tai kasvillisuustyypille ominainen heijastusspektri saataisiin selville, myös tutkitusta kohteesta, esimerkiksi metsän latvustosta, on saatava yksityiskohtaista informaatiota sen heijastusominaisuuksista vertailun mahdollistamiseksi. Luotettava kasvillisuustyyppien ja kasvilajien tunnistaminen vaatii siis hyvin monen eri aallonpituuskaistan heijastuvuuden mittaamista. Tällaisen yksityiskohtaisen hyperspektridatan tuottaminen on usein työlästä ja vaatii merkittävän määrän resursseja.

3.2 Kasvillisuusindeksit

Kasvillisuuden tunnistaminen ja luokittelu heijastusspektrien avulla vaatii suurta työmäärää, ja siksi onkin pyritty kehittämään kustannustehokkaampia sovelluksia kasvillisuuden kaukokartoitukseen. Kasvillisuusindeksit ovat kasvillisuuden määrän ja laadun mittareita, jotka määrittellään vain muutaman oleellista informaatiota sisältävän aallonpituuskaistan avulla. Käytetyt aallonpituuskaistat valitaan tarkasti niin, että niiden alueen heijastavuus on verrannollinen niihin kasvin ominaisuuksiin, jotka vaikuttavat esimerkiksi lajin tunnistamiseen tai kasvin elinvoimaisuuden estimointiin. Kasvillisuusindeksien avulla pystytäänkin muun muassa arvioimaan biomassan määrää ja seuraamaan kasvillisuuden fotosynteesistä aktiivisuutta sekä rakenteellisia ja biofysikaalisia muutoksia ajan suhteen. Kirjallisuudessa on esitetty kymmeniä erilaisia kasvillisuusindeksejä, joilla kuvataan esimerkiksi kasvillisuuden runsautta tai

vesipitoisuutta. Suuret kasvillisuusindeksien arvot ovat yleensä merkinä runsaasta terveestä kasvillisuudesta kuvattujen pikselien alueella. Kasvipeitteen heijastusominaisuuksiin perustuvia kasvillisuusindeksejä on käytetty ilmaston ja ekosysteemien vuorovaikutusten tutkimuksessa, sekä esimerkiksi tulvien, kuivuuden, maastopalojen ja aavikoitumisen seurannassa. Ne ovat myös tehokas työkalu maa- ja metsätaloudessa sekä luonnon resurssien kartoittamisessa. (Campbell 2002, s.465; van Leeuwen ym 2006)

Yksinkertaisimmillaan kasvillisuusindeksit saadaan muodostettua mitattujen aallonpituuskaistojen heijastuvuusarvoja vertaamalla tarvituin laskutoimituksin. Useimmat kasvillisuusindeksit perustuvat huomattavaan heijastavuuden kasvuun noin 700 nanometrin aallonpituusalueella, mikä on vihreälle kasvipeitteelle karakteristinen ominaisuus, jota ei muilla luonnollisilla pinnoilla juurikaan esiinny (Jones ym. 2010, s. 165). Ensimmäiset kehitetyt kasvillisuusindeksit erottavat kasvillisuuden maanpinnasta ja muista kaukokartoituskuvan yksityiskohdista vertaamalla punaisen valon aallonpituuskaistan (R) ja lähi-infrapunakaistan (NIR) keskimääräisiä heijastuvuuksia. Nämä 1970-luvulla kehitetyt kasvillisuusindeksit ovat Ratio Vegetation Index

$$RVI = R/NIR$$

ja Vegetation Index Number

$$VIN = NIR/R.$$

RVI ja VIN ovat herkkiä maanpinnan optisille ominaisuuksille, mutta valotusolosuhteet eivät aiheuta niihin suurta virhettä. RVI voi häiriintyä atmosfäärin vaikutuksesta, ja sen mahdollistama kasvillisuuden kartoitus on epäluotettavaa, jos kasvipeite ei ole tarpeeksi tiheää (yli 50%) (Bannari ym. 1995).

Eräs tunnetuimmista ja eniten käytetyistä kasvillisuusindekseistä on NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) eli normalisoitu kasvillisuusindeksi, joka on perustana useimmille moderneille kasvillisuusindekseille. RVI:n ja VIN:n tapaan se saadaan laskettua punaisen valon ja infrapunasäteilyn mitatuista heijastuvuuksista kaavan

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$$

mukaan. NDVI on herkkä kasvien klorofyllipitoisuuden muutoksille, ja siten kuvaa tehokkaasti elinvoimaisen kasvillisuuden määrää kartoitetulla alueella. Runsaan biomassan alueella NDVI antaa kuitenkin saturoituneita arvoja, eikä ole tarkka. Toinen paljon käytetty kasvillisuusindeksi EVI (Enhanced Vegetation Index) on optimoitu korostamaan kasvillisuuden signaalia, ja sen avulla saadaan yksityiskohtaisempaa informaatiota tiheän kasvillisuuden alueelta kuin NDVI:llä. EVI on suunniteltu huomioimaan muun muassa latvuston kolmiulotteisen rakenteen ja siitä mahdollisesti aiheutuvat vääristymät heijastusspektreissä. Sekä NDVI:ssä että EVI:ssä tarvittavaa dataa saadaan esimerkiksi NASA:n Terra-satelliitissa sijaitsevalta MODIS-sensorilta (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer). (Huete ym. 2002)

Kaikki kasvillisuusindeksit eivät perustu ainoastaan punaisen valon ja lähi-infrapun aallonpituusalueiden heijastavuuksiin, johon kasvien fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet vaikuttavat merkittävästi. Myös muita kasvipeitteen ominaisuuksia voidaan hyödyntää kasvillisuusindeksien määrittelyyn. Tällaisia indeksejä ovat muun muassa SAVI (Soil-Adjusted Vegetation Index), joka ottaa huomioon myös maaperän heijastavuuden, sekä NDWI (Normalized Difference Water Index), joka taas on kehitetty kasvien vesipitoisuuden seuraamiseksi. Kasvillisuusindeksejä on kehitetty tiettyjä tutkimuksia ja käyttötarkoituksia varten, ja niitä parannellaan sekä muokataan yhä tarpeen mukaan. Indeksien määrittelevät aallonpituuskaistat valitaan niin, että niiden reflektanssien toisiinsa suhteuttaminen antaa kasvipeitteen kiinnostavaa ominaisuutta kuvaavan parametrin. (Jones ym. 2010, s.165–171)

Useiden kasvillisuusindeksien arvoja on verrattu lehtialaindeksiin, joka kertoo lehtien peittämän pinta-alan tietyn kokoisella maanpinnan alueella. Lehtialaindeksi on paljon käytetty parametri kasvillisuuden tutkimuksessa, sillä se kuvaa ilmakehän kanssa vuorovaikutuksessa olevan lehtialan suuruutta, ja liittyy siten ravinteiden siirron ja fotosynteesin tutkimukseen. Biomassan määrän arvioinnin lisäksi kasvillisuusindeksejä hyödynnetään kasvipeitteen kvalitatiivisessa tutkimuksessa sekä esimerkiksi vuodenajasta johtuvien fenologisten muutosten seurannassa. Niiden avulla pystytään myös karkeasti luokittelemaan kasvillisuutta lajien ja tiheyksien perusteella, mutta lajien tunnistaminen ei ole läheskään yhtä tarkkaa kuin heijastusspektreihin perustuvassa hyperspektrikartoituksessa. (Campbell 2002, s. 467–468)

Kasvillisuusindeksit ovat kuitenkin alttiita virheille, jotka täytyy ottaa huomioon datan analysoinnissa. Virhettä aiheutuu kasvillisuuden heijastavuutta vääristävistä tekijöistä, kuten esimerkiksi latvuston varjoisuudesta ja ilmakehän vaikutuksesta, kuin myös maapeitteen kirkkaudesta ja väristä. Kasvillisuusindeksejä varten mitattujen tiettyjen aallonpituuskaistojen reflektansseihin vaikuttavat kasvipeitteen ohella myös kartoitetun alueen muut ominaisuudet. Ilman näiden muiden ominaisuuksien, kuten maaperän heijastavuuden, huomioimista aineiston esikäsittelyn avulla, virheet voivat vääristää mittaustuloksia, ja siten myös indeksin laskettua arvoa. Indeksien arvon normalisointi pienentää virhettä, mikä on yksi syy normalisoidun kasvillisuusindeksin suosiolle. Tämäkään indeksi ei aina ole täysin luotettava, sillä se yliarvioi kasvipeitteen määrän kasvukauden alussa ja aliarvioi sen kasvukauden lopussa. (Bannari ym. 1995; Campbell ym. 2002, s.465–468)

3.3 Muut tekniikat

Kasvillisuuden tutkimuksessa hyödynnettävät kaukokartoitusmenetelmät eivät rajoitu ainoastaan edellä esitettyyn kasvien heijastaman sähkömagneettisen säteilyn spektrin analyysiin. Lidar (Light Detection And Ranging) eli lasermittaus on aktiivinen kaukokartoitustekniikka, joka mittaa etäisyyden sensorin ja tarkasteltavan kohteen välillä lasersäteiden avulla. Etäisyys saadaan ajasta, joka laserpulsilta kuluu kulkeutua kohteeseen ja heijastua takaisin sensorille. Lidarin avulla pystytään muun muassa arvioimaan metsien rakenteellisia ominaisuuksia kuten latvuston korkeutta ja maanpäällisen biomassan suuruutta (Dubayah ym. 2000). Ilmakehässä käytettävällä lidarilla kyetään saamaan tarkkaa informaatiota mitatusta kohteesta, mutta satelliiteissa tätä tekniikkaa ei juuri käytetä ilmakehässä tapahtuvan signaalihäviön takia. Satelliiteissa voidaan vaihtoehtoisesti käyttää SAR-tutkaa (Synthetic Aperture Radar), jolla voidaan tuottaa korkean resoluution dataa esimerkiksi puiden koosta ja muodosta (Pause ym. 2016).

Kasvillisuuden laadusta ja yksittäisten kasvien elinvoimaisuudesta kertoo myös niiden lämpötila. Kasvit pyrkivät pitämään lehtiensä lämpötilan yhteyttämisen ja kasvun kannalta optimissa, ja odottamattomat muutokset kasvien lehtien pintalämpötiloissa voivat aiheutua esimerkiksi kasvitautien aiheuttamasta stressistä. Informaatiota kasvipeitteen lämpötiloista voidaan saada esimerkiksi satelliittien infrapunasensoreilla, mutta ne eivät yleensä pysty tuottamaan tarpeeksi korkean resoluution dataa, jotta

lämpötilaerot eri kasvilajien väleillä saataisiin selville. Yksityiskohtaisempaa aineistoa saadaan muun muassa lennokkeihin tai helikoptereihin asennetuilta maan pintaa kartoittavilta lämpökameroilta. (Leuzinger ym. 2010)

Kaukokartoituksen määritelmä ei aina ole yksiselitteinen, ja useat innovatiiviset ratkaisut saatetaan jättää kaukokartoitusmenetelmien ulkopuolelle. Kaikuluotausta ei aina lueta kuuluvaksi kaukokartoitusmenetelmiin, mutta sitäkin on jossain määrin hyödynnetty etenkin vedenalaisen kasvillisuuden tutkimuksessa. Sillä on lidariin verrattava toimintaperiaate, mutta sen toiminta ei perustu sähkömagneettisen säteilyn lähettämiseen ja mittaamiseen, vaan se hyödyntää ääniaaltoja kuten ultraääntä. Kaikuluotaimilla voidaan esimerkiksi tutkia biomassan määrää vedenalaisissa ekosysteemeissä (Gagnon ym. 2008).

4 KIRJALLISUUSKATSAUS KASVILLISUUDEN KAUKOKARTOITUSKOHTEISTA

Taulukossa 1 on esitelty esimerkkitapauksia edellä mainittujen kaukokartoitusmenetelmien hyödyntämisestä kasvillisuuden määrän ja laadun tutkimuksessa. Esimerkkitapaukset on valittu siten, että esitellään mahdollisimman erilaisia kaukokartoitusmenetelmiä ja tutkimusympäristöjä.

Taulukko 1. Kaukokartoituksen soveltamiskohteita

| Tutkimuksen tekijät | Tutkimuskohde | Käytetty kaukokartoitusmenetelmä | Tutkimuksen tulokset |
|---------------------|---|---|--|
| Rosso ym. (2005) | Yhdysvaltain San Fransicon lahdella sijaitsevan marskimaa-alueen kasvillisuuden kartoitus. | AVIRIS-sensorilla tuotetun hyperspektridatan analysointi unmixing-menetelmiä (SMA ja MESMA) käyttäen. | Sekä SMA että MESMA ovat sopivia lähestymistapoja kyseisen alueen kasvillisuuden kartoitukseen ja lajien tunnistamiseen, mutta MESMA mahdollistaa paremman joustavuuden analyyseissä. |
| Zhang ym. (2003) | Kasvitautilien havaitseminen kaukokartoitus-datasta käyttämällä esimerkkinä tomaattiviljelmää Yhdysvaltain Kaliforniassa. | AVIRIS-sensorin tuottama hyperspektridata (400–2500 nm, 180 kaistaa). | Matalalta lentokorkeudelta saatu korkea spektraalisen ja spatiaalisen resoluution hyperspektridatasta on mahdollista havaita stressi vihreässä kasvillisuudessa. Perunaruton havaitsemisessa tomaattikasveista oleellisin informaatio saatiin noin 700 ja 900 nanometrin aallonpituuskaistoilta. |
| Huang ym. (2007) | Keltaruosteen havaitseminen vehnässä Pekingissä maatalouden tutkimukselle tarkoitetulla alueella. | Hyperspektridata, kasvillisuusindeksit PRI (Photochemical Reflectance Index) ja DI (Disease Index). | PRI oli kyseisessä tutkimuskohteessa tehokas työkalu kasvitautin levinneisyyden arvioinnissa. |

| | | | |
|-------------------------|--|--|--|
| Bolton & Friedl (2013) | Laajojen maissi- ja soijapapuviljelmien sadon ennustaminen Yhdysvaltojen keskiosissa. | MODIS-sensorin tuottama kaukokartoitusdata, kasvillisuusindeksit NDVI, EVI2 sekä NDWI. | EVI2 oli NDVI:ä tehokkaampi ennustamaan maissiviljelmän sadon, mutta NDWI oli paras vaihtoehto puolikuivilla alueilla. EVI2 ja NDVI toimivat yhtä hyvin soijaviljelmien sadon ennustamisessa. |
| Suárez ym. (2005) | Skotlannissa sijaitsevan istutetun metsän puiden korkeus ja latvuston 3D-mallinnus. | Lidar ja ilmavalokuvaus. | Lidarin ja ilmavalokuvauksen yhdistelmällä saatiin tarkka arvio metsän puiden lukumäärästä ja yksittäisten puiden korkeuksista. Tätä tietoa voidaan käyttää edelleen laskettaessa metsän biomassan määrää. |
| Leuzinger ym. (2010) | Sveitsissä sijaitsevan Baselin kaupungin puiden pintalämpötilat ja niiden viilentävä vaikutus kaupunkiympäristön lokaaliin ilmastoon | Lämpökamera (7,5–14 mikrometrin aallonpituus) helikopterissa. | Kaupunkialueiden puiden lämpötilat ovat lajikohtaisia. Kolmioka-puun havaittiin kykenevän minimoimaan lehtiensä lämpötilavaihtelut, ja sen todettiin menestyvän alueilla, joissa odotetaan korkeita lämpötiloja tulevaisuudessa. |
| da Luz & Crowley (2010) | Yhdysvaltain Virginiassa sijaitsevan maatalousalueen puiden latvuston kartoitus ja analysointi, sekä puulajien tunnistaminen. | Korkean spatiaalisen ja spektraalisen resoluution lämpökamerakuvat SEBASS-sensorilta (aallonpituusalue 8,0–13,5 μm). | Infrapunasensorien todettiin olevan käyttökelpoisia puiden latvuston ominaisuuksien kaukokartoituksessa. Menetelmällä on myös potentiaalia kasvilajien tunnistamisessa, mutta lisätutkimukset ovat tarpeen. |
| Gagnon ym. (2008) | Kanadan Nova Scotian rannikon merilevän sijainti hyperspektri- ja kaikuluotausdatan avulla. | CASI-550 (Compact Airborne Spectrographic Imager)-sensori sekä kaikuluotausdata. | Kaikuluotausdatan avulla tuotetun rasterin liittäminen hyperspektridataan paransi kasvillisuuden luokittelun tarkkuutta enintään noin 10 %. |

Kaukokartoitusmenetelmät mahdollistavat kasvillisuuden tutkimuksen vaikeasti saavutettavissa olevissa ympäristöissä, kuten tiheissä sademetsissä tai suoilla. Hyperspektridata sisältää yksityiskohtaista informaatiota tarkasteltavan pinnan heijastavuusarvoista ja soveltuu siten erilaisten ekosysteemien kasvipeitteen kartoitukseen. Rosson ym. (2005) julkaisemassa artikkelissa esitellään tapoja määrittämään kasvillisuuden luokitteluun hyperspektridatan avulla. Artikkelissa käsitellyn tutkimuksen kohteena oli San Fransiscon lahdella sijaitseva määrittäminen-alue. Alueesta tekee erityisen mielenkiintoisen se, että sitä on laajalti muokattu ihmisten toimesta, sille on levinnyt vieraslajeja ja sen on todettu olevan myös uhanalaisten lajien elinympäristö. Lahden kasvillisuus vaikuttaa myös alueen tulvien dynamiikkaan, mikä on tärkeää huomioida etenkin San Fransiscon kaupungin läheisen sijainnin takia.

Kyseessä olevan alueen kaltaisten suolamarskien kasvillisuuden luokitus kaukokartoitusdatan avulla on haasteellista johtuen kasvipeitteen rakenteesta, joka on paljon homogeenisempi kuin esimerkiksi metsien tai pensasarojen havaittu latvusto. Vieraslajien, joiden pelätään häiritsevän luonnollista ekosysteemiä, leviäminen on vaikeasti havaittavissa heinäkasvilajien rakenteen ja heijastusominaisuuksien samankaltaisuuden takia. Kyseisessä tutkimuksessa keskityttiinkin näiden heinäkasvilajien erottamiseen ja määrittämään kasvipeitteen rakenteen selvittämiseen. Artikkelissa on esitelty kaksi unmixing-menetelmää; SMA (Spectral Mixture Analysis) sekä sen modifioitu versio MESMA (Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis). Näitä menetelmiä käytetään hyperspektridatan analyysissä erottamaan kasvilajit pikselien sisällä, mikä mahdollistaa spatiaalisen resoluution asettamien rajoitusten sivuuttamisen. Perinteisesti kaukokartoituksessa luokittelumenetelmät perustuvat siihen, että pikseli voi kuvata vain yhtä arvoa tai kategoriaa. SMA:ssa kuitenkin oletetaan, että pikselin arvo on usean komponentin (endmember) lineaarikombinaatio. Näiden komponenttien suhteet ja suuruudet pyritään määrittelemään tällä unmixing-menetelmällä. Valittavissa olevien komponenttien lukumäärän määrittelee käytettävän kuvan spektraalinen resoluutio. Käytettäessä hyperspektridataa, jonka spektraalinen resoluutio on tyypillisesti suuri, nämä komponentit voidaan vapaasti valita tarkoitukseen sopiviksi. SMA ja MESMA valitsevat tarkastellut komponentit eri periaatteita noudattaen, ja tutkimuksen tuloksena todettiin molempien menetelmien omaavan omat heikkoutensa ja hyvät puolensa. Kasvillisuuden kartoituksen tarkkuus oli riippuvainen valittujen komponenttien kombinaatioista.

Hyperspektrikaukokartoitusta voidaan hyödyntää kasvilajien tunnistamisen lisäksi myös kasvien elinvoimaisuuden tutkimuksessa. Kasvitautilien leviäminen on maataloudessa perinteisesti havaittu paikan päällä optisista muutoksista kasveissa, mutta suurten alueiden kasvillisuuden seuranta on näillä menetelmillä työlästä ja epätarkkaa. Kaukokartoitusmenetelmät mahdollistavat laajojen viljelmien elinvoimaisuuden sekä kasvitautilien leviämisen tehokkaan seurannan. Zhangin ym. (2003) tutkimustulosten mukaan korkean spektraalisen ja spatiaalisen resoluution hyperspektrikuvista pystytään tehokkaasti havaitsemaan kasvitautilien häiritsemä kasvillisuus, mikä mahdollistaa tartunnan saaneiden kasvien oikeanlaisen käsittelyn ja taudin leviämisen ehkäisyn. Kasvin altistuminen taudista johtuvalle stressille havaitaan muutoksina kasvin heijastusspektrissä näkyvän valon ja infrapunaa aallonpituusalueilla. Tutkimus toteutettiin altistamalla tomaattiviljelmiä perunarutolle (*P. infestans*) ja mittaamalla tomaattikasvien latvuston heijastavuutta ruton eri vaiheissa. Heijastusspektrien mittaus suoritettiin vuonna 1998, jolloin olosuhteet olivat otolliset kyseisen ruton leviämiseksi. In situ -mittauksessa käytettiin 400–2500 nanometrin aallonpituusalueita mittaavaa spektrometriä, joka sijoitettiin yhden metrin korkeuteen latvustosta. Tämän mittauksen tuloksena saatiin selville terveiden ja perunarutolle altistuneiden tomaattien latvustojen heijastavuuksien erot. Näitä mittaustuloksia verrattiin hyperspektridataan, joka saatiin matalan lentokorkeuden AVIRIS-sensorilta (Airborne Visible / Infrared Imaging Spectrometer). Ennen analysointia data esikäsiteltiin, jotta ilmakehästä aiheutuvat vääristymät saataisiin korjattua. Tutkimuksen tuloksena todettiin, että hyperspektridatalla on paljon hyvää potentiaalia kasvitautilien havaitsemisessa. Tehokkaimmin kyseinen perunarutto havaittiin tutkimalla 700–900 nanometrin aallonpituusalueen säteilyn heijastuvuuksia.

Kasvitautilien aiheuttama stressi on havaittavissa myös kasvillisuusindeksien avulla. Huangin ym. (2007) tutkimuksessa käsiteltiin kaukokartoitetun PRI:n (Photochemical Reflectance Index) tarkkuutta arvioida toista indeksiä, DI:tä (Disease Index), jota ei määritelty kaukokartoitusmenetelmin. Näin arvioitiin PRI:n soveltuvuutta kasvitautilien tunnistamiseen hyperspektrikuvasta. Kolme erityyppistä vehnäkasvia altistettiin keltaruosteelle (*Biotroph Puccinia striiformis*), ja latvuston heijastusspektrit sekä DI-arvot mitattiin. Näitä in situ -mitattuja parametreja verrattiin ilmasta kuvattuun hyperspektridataan, josta määritettiin PRI. PRI kuvaa kasvillisuuden fotosynteesistä aktiivisuutta vertaamalla 531 ja 570 nanometrin aallonpituuskaistojen reflektansseja. Kasvitautilien aiheuttama stressi häiritsee kasvin yhteyttämistä, ja siksi PRI on oiva

työkalu kasvitautilien havainnoinnissa. Tutkimuksen ensimmäisessä vaiheessa havaittiin lineaarinen riippuvuus PRI:n ja DI:n välillä. Mittaukset toistettiin kahden kasvukauden aikana useaan kertaan, ja korrelaatio PRI:n ja DI:n välillä oli jokaisella mittauskerralla selvä. Tutkimuksen tuloksena todettiin PRI:n olevan tehokas työkalu ainakin kyseisen kasvitautien havaitsemiseen ja sen leviämisen seuraamiseen vehnäviljelmissä. On kuitenkin huomattava, että tutkimus suoritettiin testikäyttöön tarkoitettulla viljelmällä parin vuoden ajanjaksolla. Todellisuudessa vehnäviljelmien heijastusspektreihin, ja siten laskettuihin kasvillisuusindekseihin, vaikuttaa useat alueellisesti vaihtelevat ympäristökijät kuten maaperän ominaisuudet ja vesipitoisuus, ja korrelaation luotettavuuden varmistaminen vaatisi lisätutkimuksia.

Kasvillisuusindeksejä voidaan käyttää maataloudessa viljelmien hyvinvoinnin seurannan lisäksi myös sadon arviointiin. Boltonin ym. (2013) julkaisema artikkeli käsittelee MODIS-sensorin (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) tuottaman datan soveltuvuutta maissi- ja soijapapuviljelmien sadon ennustamisessa sekä vuosittaisten vaihteluiden havainnoinnissa. Artikkelissa esitellyssä tutkimuksessa vertailtiin normalisoidun kasvillisuusindeksin NDVI sekä EVI2:n (MODIS two-band Enhanced Vegetation Index) tarkkuutta. Mukaan vertailuun liitettiin myös NDWI (Normalized Difference Water Index), joka on suunniteltu olemaan herkkä vesipitoisuuden aiheuttamille muutoksille kasveissa, ja joka siten huomioi maaperän kuivuuden vaikutuksen satoon. Tutkimuksessa käytettiin informaatiota maissi- ja soijapapusadoista sekä MODIS-sensorin tuottamaa kaukokartoitusdataa vuosien 2004–2009 ajalta. Usean vuoden satoja verrattiin laskettuihin NDVI:n, EVI2:n ja NDWI:n arvoihin. Maissin sadon ja NDWI:n välillä havaittiin voimakkain korrelaatio. Soijapapuviljelmän tapauksessa parhaiten sadon suuruutta ennusti EVI2. Tutkimuksessa huomattiin myös, että ilman datan esikäsitteilyä fenologisten vaikutusten korjaamiseksi, korrelaatiot olivat systemaattisesti noin 10 % pienempiä. Sadon suuruuden ja kasvillisuusindeksien välisten korrelaatioiden vahvuus vaihteli myös ajan ja paikan suhteen kasvuympäristöjen erilaisuuden takia.

Vaikka hyperspektrikartoituksella saadaan kasvipeitteestä yksityiskohtaista informaatiota, joka mahdollistaa kasvien luokittelun ja niiden elinvoimaisuuden arvioinnin, se ei ole ainoa käytetty kaukokartoitusmenetelmä kasvillisuuden tutkimuksessa. Ilmavalokuvauksen ja lidarin hyödyntämistä metsätaloudessa käsittelee muun muassa Suárez ym. (2005) tutkimuksessaan. Nämä kaksi

kaukokartoitusmenetelmää yhdistettiin yksittäisten puiden korkeuden ja puiden lukumäärän arvioimiseksi Skotlannissa sijaitsevan metsän määrättyllä alueella. Lidar on tehokas työkalu puiden latvuston dimensioiden mittaamisessa jopa muutaman senttimetrin vertikaalisella ja horisontaalisella tarkkuudella. Vain harvat kaupallisesti saatavilla olevat laitteistot ovat kuitenkin näin tarkkoja. Lidarin rajoitteena on se, että sillä suoritetaan pistemittauksia, jolloin puiden latvustojen korkeimmat huiput ja matalimmat kohdat saattavat jäädä mittauksen ulkopuolelle. Tutkimuksessa käytettiin korkean spatiaalisen resoluution digitaalisia (< 25 cm/pikseli) ilmavalokuvia sekä lidaria, joka mittasi 3–4 signaalia jokaisen kartoitetun neliömetrin alueella. Ilmavalokuvauksen ja lidarin avulla saatu kaukokartoitusdata yhdistettiin ja luotiin digitaalinen 3D-malli metsän latvustosta. Optinen data auttoi havaitsemaan yksittäisten puiden latvat, jotka saattoivat jäädä lasermittauksessa huomiotta. Latvuston mallin tarkkuus myös varmistettiin käyttämällä näitä kahta kaukokartoitusmenetelmää yhdessä. Tutkimuksessa oli vertailun mahdollistamiseksi kenttätyönä mitattu kartoitetun alueen puiden korkeuksia, ja lidarin todettiin aliarvioivan niitä noin 7–8 %. Yksittäisten puiden havaitseminen kaukokartoituskuvasta on riippuvainen käytetyn sensorin ominaisuuksista ja kuvan resoluutioista. Artikkelin mukaan puiden korkeuksien arvioiminen kaukokartoituskuvassa havaittavien heijastusominaisuuksien perusteella vaatii lisätutkimuksia. On myös huomioitava, että käytettäessä lidaria ilmasta, pienemmät puut saattavat jäädä korkeimpien alle, jolloin laserpulssi ei tavoita niiden latvoja. Tutkimuksessa todettiinkin käytetyn kaukokartoitusmenetelmän soveltuvan suurimpien puiden ja korkeimpien latvustojen sijainnin määrittämiseen. Korkeat, elinvoimaiset puut ja niiden sijainti antavat tärkeää informaatiota metsän pohjakerroksesta ja ympäristön elinolosuhteista.

Kaukokartoitusmenetelmät soveltuvat niin laajojen metsien kuin myös kaupunkialueiden kasvillisuudenkin havainnointiin. Sveitsissä Baselin kaupungissa suoritettiin tutkimus (Leuzinger ym. 2010), jossa perehdyttiin puiden lokaalia mikroilmastoa viilentävään vaikutukseen. Tutkimuksessa mitattiin kolmentoista eri puulajin latvuston lämpötiloja urbaanissa ympäristössä heinäkuussa 2004. Mittaukseen käytettiin 400 metrin korkeudessa lentävään helikopteriin asennettua lämpökameraa, joka toimi 7,5–14 mikrometrin aallonpituusalueella. Mittauspisteeksi valittiin jokaisen mittauskohteen olleen puun latvuston näennäinen keskipiste, jotta latvuston rakenteesta aiheutuvat vääristymät (varjoalueet) saataisiin minimoitua. Lämpökartoitetulla alueella seurattiin myös ilman lämpötilaa, ja tuotetusta datasta saatiin selville, että tarkasteltujen

puiden latvustojen lämpötilat vaihtelivat ilman lämpötilan keskiarvoon verrattuna asteen alhaisemmasta neljä astetta korkeampaan. Havaittiin, että viiden puulajin latvustot kymmenen puulajin joukosta olivat pintalämpötilaltaan viileämpiä puistoympäristössä kuin tienvarsilla. Tutkimuksessa väitetään tämän johtuvan teiden lähistöllä vaikuttavasta suuremmasta säteilymäärästä. Selvisi myös, että puulajien, joiden lehdet olivat pinta-alaltaan suurempia, lämpötilat olivat korkeampia kuin pienilehtisten lajien. Tutkimuksen lopputuloksena todettiin, että kaupunkiympäristössä puiden ilmastoa viilentävä vaikutus ja sen merkittävyys ovat lajikohtaisia. Puiden lehtien pintalämpötilat riippuvat puun ja sen lehtien koosta sekä muista lajikohtaisista seikoista, kuten latvuston rakenteesta. Useiden pienilehtisten puulajien havaittiin ylläpitävän pintalämpötilansa ympäröivään lämpötilaan verrattuna viileänä myös korkeissa ilman lämpötiloissa, ja erityisesti kolmiokan (*Gleditsia triacanthos*) todettiin olevan sopiva puulaji ympäristön viilentämiseen kyseissä kaupunkiympäristössä.

Infrapunäsäteilyä mittaavien sensoreiden soveltuvuutta kasvilajien tunnistamiseen on myös tutkittu. Da Luzin ym. (2010) tutkimus käsitteli korkean spatiaalisen ja spektraalisen resoluution lämpökartoituskuvioiden käyttöä metsän latvuston ominaisuuksien havaitsemisessa ja mahdollisuutta lajien tunnistamiseen. Artikkelissa esitellyssä tutkimuksessa pyrittiin tunnistamaan 53 eri puulajia Yhdysvaltain Virginiassa sijaitsevalla tutkimusalueella hyperspektrikuvioiden avulla. Datan luomiseksi käytettiin 1000 metrin korkeudesta kuvaavaa SEBASS-hyperspektrisensoria (Spatially-Enhanced Broadband Array Spectrograph System), joka mittasi 128 aallonpituuskaistaa 7,66 ja 13,55 mikrometrin välisellä spektrillä. Kyseinen sensori mittaa kohteen emissiivisyyttä, ja spatiaalinen resoluutio tuotetuissa kuvissa oli 1 m/pikseli. Tutkituista puulajeista otettiin lehtinäytteet, ja eri lajien ominaiset heijastusspektrit (alueella 2,5–14,0 μm) selvitettiin laboratorio-olosuhteissa. Vain noin puolet tutkituista puulajeista onnistuttiin tunnistamaan infrapunakuvista, ja nekin vaihtelevalla menestyksellä. Parhaimmalla tarkkuudella tunnistettiin ne lajit, joiden lehdet olivat litteitä ja pinta-alaltaan verrattain suuria, tai jotka omasivat suurimmat latvustot. Tutkimuksessa todettiin, että parempia tuloksia olisi saavutettu suuremmalla spatiaalisella resoluutiolla, kuvien kalibroinnilla sekä atmosfääristä johtuvat virheet poistamalla datan esikäsittelyllä ja korjauksella. Tavoitteena oli kuitenkin varmistaa infrapunakameroiden käyttökelpoisuus kasvipeitteen havainnointiin, ja tavoite toteutui. Kyseisellä kaukokartoitusmenetelmällä on potentiaalia myös lajien tunnistamiseen, mutta

lisätutkimuksia tarvitaan infrapunasensoreiden rajoitusten ja sopivien käyttökohteiden määrittämiseksi.

5 YHTEENVETO

Useat kaukokartoitustekniikat soveltuvat hyvin kasvillisuuden kartoitukseen, kasvillisuustyyppien luokitteluun sekä kasvien elinvoimaisuuden seurantaan. On kuitenkin tapauskohtaisesti harkittava, mikä menetelmä sopii parhaiten kiinnostuksen kohteena olevan ominaisuuden selvittämiseksi. Käytettävissä on erilaisten toimintaperiaatteiden mukaan toimivia alustoja ja sensoreita, sekä kasvien eri ominaisuuksiin perustuvia analyysimenetelmiä. Jokaisella kaukokartoitusmenetelmällä on omat vahvuutensa ja heikkoutensa, joita tulee punnita menetelmää valittaessa. Luotettavien tulosten saavuttaminen vaatii datan oikeanlaista käsittelyä sekä tarkkaa analyysyä.

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli esitellä, millaisia kaukokartoitusmenetelmiä voidaan hyödyntää kasvillisuuden tutkimuksessa. Yleisten kaukokartoitustekniikoiden toimintaperiaatteet selitettiin pääpiirteittäin, ja valaistiin myös kaukokartoitusdatan hankinnassa sekä analysoinnissa huomioitavia seikkoja, kuten mahdollisia virhelähteitä. Kirjallisuuskatsauksena esiteltiin tutkimustuloksia, jotka selventävät miten kaukokartoitusmenetelmiä on hyödynnetty käytännössä muun muassa kasvillisuuden luokittelussa ja kasvien elinvoimaisuuden seurannassa.

Kaukokartoitusmenetelmät ovat verrattain uusia työkaluja ympäristön havainnoinnissa, ja uusia sovelluksia kehitetään jatkuvasti muun muassa juuri kasvillisuuden kartoitusta varten. Viime vuosikymmeninä satelliitit ovat mahdollistaneet hyvin laajojen alueiden kaukokartoituksen, ja globaalien ilmiöiden, kuten ilmastonmuutoksen, vaikutusten seurannan. Ilmastonmuutoksen myötä yleistyvät äärimmäiset sääilmiöt, kuten kuivuus ja rankkasateet, ovat sekä ihmiskunnalle, että luonnon ekosysteemeille ongelmallisia. Maapallon kasvipeite on tärkeässä roolissa ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden muutosten kontrolloinnissa, ja kasvillisuus omalla tavallaan siten myös hidastaa ilmastonmuutosta. On tärkeää seurata kasvillisuuden levinneisyyttä ja elinvoimaisuutta näiden merkittävien muutosten aikana - ovathan kasvit planeettamme elämän perusta.

LÄHTEET

Bannari, A., Morin, D. & Bonn, F., 1995. A Review of Vegetation Indices. *Remote Sensing Reviews*, 13(1), S. 95–120.

Bolton, D. K. & Friedl, M. A., 2013. Forecasting crop yield using remotely sensed vegetation indices and crop phenology metrics. *Agricultural and Forest Meteorology*, 173(1), S. 74–84.

Campbell, J. B., 2002. *Introduction to Remote Sensing*. Third edition. New York: The Guilford Press, 621 s. ISBN 1-57230-640-8

da Luz, B.R. & Crowley, J. K., 2010. Identification of plant species by using high spatial and spectral resolution thermal infrared (8.0–13.5 μm) imagery. *Remote Sensing of Environment*, 114(1), S. 404–413.

Dubayah, R. O. & Drake, J. B., 2000. Lidar Remote Sensing for Forestry. *Journal of Forestry*, 98(6), S. 44–46.

Fassnacht, F. E., Latifi, H., Sterenczak, K., Modzelewska, A., Lefsky, M., Waser, L. T., Straub, C. & Ghosh, A., 2016. Review of studies on tree species classification from remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 186(1), S. 64–87.

Gagnon, P., Scheibling, R. E., Jones, W. & Tully, D., 2008. The role of digital bathymetry in mapping shallow marine vegetation from hyperspectral image data. *International Journal of Remote Sensing*, 29 (3), S. 879–904.

Huang, W., Lamb, D. W., Niu, Z., Zhang, Y., Liu, L. & Wang, J., 2007. Identification of yellow rust in wheat using in-situ spectral reflectance measurements and airborne hyperspectral imaging. *Precision Agriculture*, 8(1), S. 187–197.

Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X. & Ferreira, L.G., 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1), S. 195–213.

Jones, H. G. & Vaughan, R. A., 2010. *Remote Sensing of Vegetation: Principles, Techniques, and Applications*. New York: Oxford University Press, 353 s. ISBN 978-0-19-920779-4

Leuzinger, S., Vogt, R. & Körner, C., 2010. Tree surface temperature in an urban environment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(1), S. 56–62.

Lillesand, T. M. & Kiefer, R. W., 2000. *Remote Sensing and Image Interpretation*. Fourth Edition. New York: John Wiley & Sons, Inc., 724 s. ISBN 0-471-25515-7

Pause, M., Schweitzer, C., Rosenthal, M., Keuck, V., Bumberger, J., Dietrich, P., Heurich, M., Jung, A. & Lausch, A., 2016. In Situ/Remote Sensing Integration to Assess Forest Health—A Review. *Remote Sensing*, 8(6).

Rosso, P. H., Ustin, S. L. & Hastings, A., 2005. Mapping marshland vegetation of San Francisco Bay, California, using hyperspectral data. *International Journal of Remote Sensing*, 26(23), S. 5169–5191.

Suárez, J. C., Ontiveros, C., Smith, S. & Snape, S., 2005. Use of airborne LiDAR and aerial photography in the estimation of individual tree heights in forestry. *Computers and Geosciences*, 31(2), S. 253–262.

van Leeuwen, W. J. D., Orr, B. J., Marsh, S. E. & Herrmann, S. M., 2006. Multi-sensor NDVI data continuity: Uncertainties and implications for vegetation monitoring applications. *Remote Sensing of Environment*, 100(1), S. 67–81.

Xie, Y., Sha, Z. & Yu, M., 2008. Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review. *Journal of Plant Ecology*, 1(1), S. 9–23.

Zhang, M., Qin, Z., Liu, X. & Ustin, S. L., 2003. Detection of stress in tomatoes induced by late blight disease in California, USA, using hyperspectral remote sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 4(4), S. 295–310.