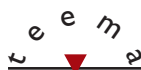


Miina Rautiainen

Fysikaaliset menetelmät metsien kaukokartoituksessa



Tavoitteena metsien monet hyödyt

Uusia kaukokartoitusmahdollisuuksia

Odotukset kaukokartoituksella saatavasta ympäristötiedon määrästä ja luotettavuudesta sekä tiedon tuottamisen helppoudesta ovat huimaavia. Taustalla lienee se, että kaukokartoitusaineistot ovat monipuolistuneet ja niiden saatavuus on merkittävästi helpottunut reilussa kymmenessä vuodessa. On saatavilla satoja aallonpituuksia kattavia hyperspekt-risiä aineistoja, useista katselukulmista mitattuja aineistoja ja jopa päivittäin otettuja satelliittikuvia jo 15 vuoden ajan. Suurin osa satelliittikaukokartoitusaineistoista on nykyään ilmaisia ja nopeasti kenen tahansa ladattavissa internetissä. Vaikka aineistot ovat kaikkien ulottuvilla, saa kohteista tietoa vain pintaraapaisun verran katselemalla satelliittikuvia esimerkiksi Google Earthissä. Aineistojen monipuolisuus on tuonut mukanaan tarpeen kehittää tehokkaampia menetelmiä, joilla voidaan tulkita näitä aineistoja ja ymmärtää mitä mitattu säteily-signaali pitää sisällään eri aallonpituusalueilla. On myös haaste erottaa signaali kohinasta. Toisaalta monipuolistuneet kaukokartoitusaineistot mahdollistavat uudenlaisten metsän rakennetta tai toimintaa kuvaavien muuttujien arvioimisen.

Metsäalan ammattilaisille ja useille metsänomistajille ovat jo tuttuja perinteisten muuttujien, kuten puuston piteuden tai runkotilavuuden kaukokartoitus. Vaikka näiden perinteisempien tunnusten arviointimenetelmät tarkentuvat koko ajan ja niiden kehitystyö jatkuu, on kaukokartoitusta toki mahdollista käyttää myös muiden metsää kuvaavien muuttujien selvittämiseen. On selvää, että erilaiset

kaukokartoitusaineistot sopivat vastaamaan eri kysymyksiin. Tarvitsemmekin nyt tietoa siitä, mikä kaukokartoitusaineisto soveltuu parhaiten mihinkin sovellukseen.

Fysikaalisen kaukokartoituksen historia

Metsän optinen kaukokartoitus fysikaalisena ilmiönä perustuu 1950-luvulla julkaistuun säteilynsiirron teoriaan, jonka avulla kuvataan säteilyn kulkua kasvustossa ja kasvustosta ulos kohti satelliittiin, lentokoneeseen tai lennokkiin kiinnitettyä mittalaitetta. Teoria sitoo toisiinsa kaikki optisen kaukokartoituksen sovellusalat (mm. kasvillisuus, ilmakehä, lumi) ja -tekniikat, ja on laajasti käytössä kaukokartoituksen rinnakkaisilla aloilla esimerkiksi astronomiassa, optiikassa ja meteorologiassa.

Metsän kaukokartoitus on mitattujen spektrien tulkintaa; eri kaukokartoitusinstrumentit mittaavat eri aallonpituusalueita eri vuoden- ja vuorokaudenajoina. Metsän spektrin muodostumiseen vaikuttavat niin kutsutut biofysikaaliset muuttujat. Niitä ovat metsän latvuston aukkoisuutta ja syvyyttä kuvaavat tunnuksat kuten lehtialaindeksi tai latvuspeitto. Metsän spektriin vaikuttavat myös lehtien, neulasten, oksien ja runkojen optiset ominaisuudet, samoin kenttä- ja pohjakerrosten kolmiulotteinen rakenne ja optiset ominaisuudet. Perinteiset metsämuuttujat, kuten läpimitta ja pohjapinta-ala, eivät suoraan vaikuta metsän heijastamaan signaaliin, mutta osa niistä korreloi toki selvästi esimerkiksi lehtialaindeksin kanssa. Fysikaaliset kaukokartoitusmenetelmät pe-

rustuvat biofysikaalisiin muuttujiin ja metsän rakenteen matemaattiseen kuvaamiseen niiden kautta.

Optisten kaukokartoitusaineistojen tulkintaan on olemassa kaksi laajaa menetelmäryhmää, jotka joskus menevät osin päällekkäinkin. Kyse ei ole jaosta huolimatta suoranaisesti kilpailevista tai täysin erilisistä lähestymistavoista. Perinteisesti tunnetumpi tapa tulkita kaukokartoitusaineistoja metsälalla ovat olleet erilaiset tilastolliset menetelmät. Sitä mukaa kun globaalit kartoitussovellukset ja entistä monimutkaisemmat aineistot ovat tulleet käyttöön, ovat fysikaaliset menetelmät hiljalleen yleistyneet. Fysikaalisilla menetelmillä tarkoitetaan metsän heijastusmalleja ja muutamia hyvin määriteltyjä kasvillisuusindeksejä, joiden avulla tiivistetään tietoa usealla eri aallonpituudella heijastuneesta säteilystä. Fysikaalisissa menetelmissä tavoitteena on kuvata matemaattisesti metsän heijastussignaalin muodostumista ja soveltaa erilaisia inversiotekniikoita satelliittikuvien tulkinnassa. Fysikaalisia heijastusmalleja voidaan rakentaa niin optisten satelliittista tai lentokoneista mitattujen kaukokartoitusaineistojen kuin myös laserkeilausaineistojen tulkintaan. Toisin kuin tilastolliset kaukokartoitusmenetelmät, fysikaaliset mallit ovat yleispäteviä ja sovellettavissa myös maantieteellisen kehitysalueensa ulkopuolella. Fysikaaliset menetelmät ovatkin ainoa vaihtoehto säännölliseen globaaliin kartoitukseen, jossa on vain niukasti tarjolla ennakkotietoja maapinnalla olevasta kohteesta tulkintamallin parametrisoitua varten. Kartoitussovellusten lisäksi fysikaaliset heijastusmallit tarjoavat työkalun erilaisiin herkkyysanalyysiin, joiden avulla voidaan selvittää kuinka (ja mitkä) muutokset metsän rakenteessa ovat havaittavissa erilaisissa kaukokartoitusaineistoissa.

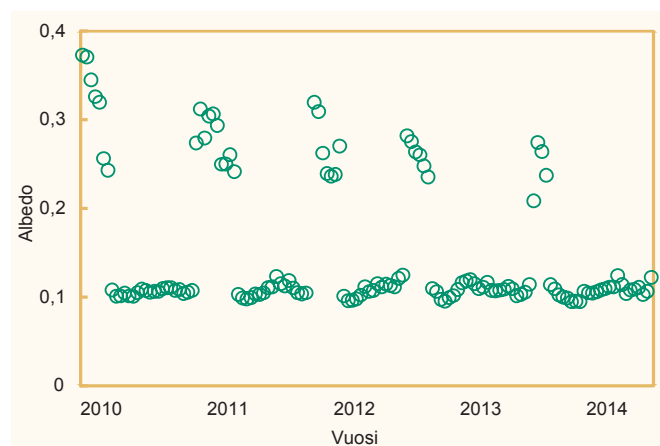
Fysikaalisten kaukokartoitusmenetelmien viimeaikainen yleistymisen on seurausta satelliittiaineistojen monipuolistumisesta ja maailmanlaajuisen kasvillisuuden kartoituksen asettamista vaatimuksista. Näiden menetelmien juuret ovat kuitenkin jo 1960-luvulla Neuvosto-Virossa kehitetyissä kasvuston säteilymalleissa. Aluksi fysikaalisia kaukokartoitusmenetelmiä kehitettiin peltokasveille. Syynä tähän oli mm. helppous testata malleja käsikäyttöisen spektrometrin avulla. Tuolloin alalla työskenteli suhteellisen pienen tutkijajoukko, joka kehitti teoreettisia malleja, joita oli vaikea testata mittausaineistojen puutteessa.

Kaukokartoitusaineistojen yleistyessä – ja tietokoneiden laskentakapasiteetin kasvaessa – fysikaaliset menetelmät ovat kuitenkin saavuttaneet varsin laajan mielenkiinnon: nyt fysikaalisten mallien avulla etsitään aktiivisesti ymmärrystä mm. siitä mitä uusia metsää kuvaavia muuttujia on mahdollista kartoittaa jo rutiiniksi muodostuneiden perinteisten tunnusten lisäksi. Metsille fysikaalisia malleja alettiin kehittää 1980-luvulla Tarton observatoriossa (Virossa) ja Bostonin yliopistossa (Yhdysvalloissa), mutta vasta 1990-luvun loppupuolella oli tarjolla useita vaihtoehtoisia heijastusmalleja. Nämä mallit eroavat toisistaan sen suhteen miten metsikön, ja erityisesti puiden latvusten rakenne, on niissä kuvattu. Havumetsissä toimivat vain heijastusmallit, joissa on riittäväällä tarkkuudella matemaattisesti kuvattu neulasten ryhmittymisen versoihin.

Vanhin ja suurelle yleisölle tunnetuin fysikaalisten menetelmien menestystarina on vuodesta 2000 alkaen viikoittain tuotettu koko maapallon lehti-alaindeksikartta. Kartan tuottaa NASA Bostonin yliopiston kehittämällä fysikaalisella heijastusmallilla MODIS-satelliittikuvista. Kartta on vapaasti saatavilla internetissä, ja sitä onkin sovellettu monenlaisiin ekologisiin tutkimuksiin.

Metsien merkitys maapallon albedolle: apua fysikaalisista kaukokartoitusmenetelmistä?

Kasvipeitteen ja maankäytön muutokset muuttavat maapallon albedoa, eli sitä missä määrin tuleva auringon säteily heijastuu takaisin ilmakehään ja avaruuteen. Albedo voidaan määritellä useilla eri tavoilla, mutta tavallisin on määritelmä, jossa albedo kuvaa kohteen heijastamaa sähkömagneettista säteilyä kaikkien ilmakehää läpäisevien aallonpituuksien (n. 300–5000 nm) yli ja myös yli koko puoliavaruuden. Metsän albedo vaikuttaa osaltaan maapallon ilmastoon, ja on yksi isoista epävarmuustekijöistä maapallon säteilypakotteen mallintamisessa. Kesustelu metsän albedon globaalista merkityksestä on vasta nousemassa hiilenkiertokeskustelujen rinnalle. Nykyisten tutkimustulosten synteesi osoittaa selvästi, että tarvitaan luotettavia ennusteita metsän rakenteen (ja metsänhoidon) vaikutuksesta maapallon albedoon. Kaukokartoitustutkimuksista jo tiedäm-



Kuva 1. Esimerkki boreaalisen metsäalueen albedon vuodenaikaismuutoksista Hyytiälän metsäaseman ympäristössä (7 km × 7 km alue) vuosina 2010–2014. Albedoarvot (MCD43A, C5, ”black-sky shortwave albedo”) on laskettu MODIS-satelliittikuvista NASA:n DAAC-tietokannassa. Mukana ovat vain korkeimman laatuluokituksen saaneet havainnot.

me, että erilainen puustorakenne johtaa erilaiseen spektriin ja sitä kautta erilaiseen albedoon. Esimerkiksi boreaalisen metsän albedo on pääsääntöisesti välillä 0.08–0.45, riippuen mm. puulajista, metsän rakenteesta ja lumitilanteesta (kuva 1).

Fysikaaliset heijastusmallit tarjoavat erinomaisen – ja ainoan laskennallisen – työkalun metsän rakenteen ja albedon välisen suhteen tarkasteluun kahdella eri tavalla. Fysikaalisilla heijastusmalleilla voidaan muuntaa satelliittimittauksista saadut (yleensä yhdessä tai muutamassa kulmassa mitatut) heijastussuhteet albedoksi tai vaihtoehtoisesti voidaan simuloida tunnetun metsän rakenteen perusteella sen albedo koko vuodenkierron ajan. Albedo on hetkittäinen muuttuja: se riippuu juuri tietyllä hetkellä saapuvasta auringonsäteilystä eli auringon kulmasta ja ilmakehän tilasta. Ilmastonmuutostutkimuksia varten lasketaan kuitenkin yleensä albedoista keskiarvoja pidempien ajanjaksojen, jopa koko vuoden, yli.

Suomen laajat ja yksityiskohtaiset metsäaineistot yhdistettyinä fysikaalisiin malleihin ja satelliittikuviin tarjoavat kansainvälisesti ainutlaatuisen mahdollisuuden tarkastella sitä, miten mm. puulaji ja biomassa vaikuttavat metsien albedoon ja sitä kautta ilmastoon. Alustavissa tutkimuksissa on osoitettu, että boreaalisen metsän rakenteen ja albedon väliseen suhteeseen vaikuttaa vahvasti lumitilanne ja, ehkä perinteisestä ajattelutavasta hieman poiketen, erityisesti metsän pintakasvillisuus. Se, miten metsän rakenne vaikuttaa albedoon, vaihtelee runsaasti

jo Suomenkin sisällä kasvillisuusvyöhykkeestä toiseen ja riippuu lumipeitteisen ajanjakson pituudesta. Yleensä metsän albedo kasvaa siirryttäessä kohti pohjoista Suomea. Riippuvuudet albedon ja metsän biomassan tai latvuspeiton välillä ovat tiiviimpiä talvella kuin sulan maan aikana, koska metsän pohjalla olevan lumen spektri vaihtelee vähemmän kuin eri pintakasvillisuustyypien spektrit. Käytännön metsätalouden näkökulmasta voidaan taas todeta, että männyn tai koivun osuukien lisääminen kuusikoissa kasvattaa metsän albedoa ja tuottaa sitä kautta ”myönteisiä ilmastovaikutuksia”.

2010-luvun uusia tuulia

Albedotutkimusten lisäksi 2010-luvulla fysikaalisia kaukokartoitusmenetelmiä kehitetään käytännön sovelluksiin kuten puiden fysiologian ja metsän fenologian lähes reaaliaikaiseen seurantaan avaruudesta käsin. Myös fysikaalisten menetelmien teoreettinen kehitystyö jatkuu; ratkaisematta on vielä useita kysymyksiä liittyen mm. metsän latvusrakenteen tehokkaaseen ja yksinkertaiseen matemaattiseen kuvaamiseen malleissa sekä soveltuvimpiin inversiotekniikoihin. Tulevaisuudessa on nähtävissä myös synergiaetuja aineistojen yhdistämisen kautta: muodostetaan pitkiä aikasarjoja useista kaukokartoitusaineistoista (joilla on erilaiset spatiaaliset, ajalliset ja spektriset resoluutiot), ja tulkitaan niistä maailmanlaajuisesti metsissä tapahtuneita vuodena-

kais- ja vuosikymmenmuutoksia. Fysikaalisilla menetelmillä on myös tulossa sovelluksia skaalauksen parissa: miten tulkitaan ja yhdistetään tietoa, joka on mitattu eri mittakaavassa kuin missä ilmiö itse on? Fysikaaliset menetelmät tulevat todennäköisesti yhä yleistymään myös perustutkimuksen ulkopuolisissa sovelluksissa. Kehitys alalla on nopeaa.

Kirjallisuutta

- Kuusinen, N. 2014. Boreal forest albedo and its spatial and temporal variation. *Dissertationes Forestales* 179. 48 s. <http://www.metla.fi/dissertationes/df179.htm>, doi:10.14214/df.179
- Lukeš, P., Rautiainen, M., Manninen, T., Stenberg, P. & Möttöus, M. 2014. Geographical gradients in boreal forest albedo and structure in Finland. *Remote Sensing of Environment* 152: 526–535.
- Lukeš, P., Stenberg, P. & Rautiainen, M. 2013. Relationship between forest density and albedo in the boreal zone. *Ecological Modeling* 261–262: 74–79.
- Rautiainen, M., Heiskanen, J. Eklundh, L., Möttöus, M., Lukeš, P. & Stenberg, P. 2010. Ecological applications of physically-based remote sensing methods. *Scandinavian Journal of Forest Research* 4: 325–339.

■ Apulaisprof. Miina Rautiainen, Maankäyttötieteiden laitos ja Radiotieteen ja -tekniikan laitos, Aalto-yliopisto
miina.a.rautiainen@aalto.fi