



Titta Majasalmi

Metsän lehtialaindeksin mittaaminen, mallinnus ja arviointi

Majasalmi T. (2021). Metsän lehtialaindeksin mittaaminen, mallinnus ja arviointi. Metsätieteen aikakauskirja 2021-10569. Tieteen tori. 11 s. <https://doi.org/10.14214/ma.10569>

Yhteystiedot Aalto-yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu, Rakennetun ympäristön laitos, Espoo

Sähköposti titta.majasalmi@aalto.fi

Hyväksytty 20.5.2021

Amazonin sademetsät ovat viimeisen kymmenen vuoden aikana muuttuneet hiilinielusta hiilen lähteeksi – tällaisia tuloksia ei saataisi ilman satelliittiaineistoja ja analyysiketjuja, joiden kautta voidaan arvioida yhteyttävän lehtialan määrän muutoksia ja terveydentilaa. Yhteyttävän lehtialan mittarina käytetään usein ns. lehtialaindeksiä (engl. Leaf Area Index, LAI), joka kuvaa lehtien (neulasten) toispuolista pinta-alaa maapinta-alaa kohden ($m^2 m^{-2}$). Käsitteenä LAI ei ole uusi, sillä se määriteltiin ensimmäisen kerran jo 1940-luvulla. Kasvillisuuden LAI vaikuttaa suoraan veden- ja kaasujenvaihtoon maan ja ilmakehän välillä ja tätä kautta edelleen esimerkiksi pilvienmuodostukseen ja maanpinnan albedoon. LAI onkin yksi tärkeimmistä ympäristön mallinnuksessa tarvittavista parametreista, sillä sen arvo heijastelee kasvillisuuden 'keuhkojen kokoa' ja elinvoimaa. Lehtialaindeksillä on tärkeä rooli myös metsäntutkimuksessa, ja tämän kirjoitelman tarkoituksena onkin lyhyesti kertoa LAI:n mittauksen historiasta ja käytetyistä menetelmistä, tuoda esiin käytännön näkökulmia mittausten otantaan ja virhelähteisiin liittyen ja tarjota ajankohtainen katsaus globaaleihin otettiin satelliittikuviin perustuviin LAI-tuotteisiin.

LAI:n mittauksen historia

LAI-mittaushistorian voidaan laskea alkaneen siitä, kun peltokasvien tuotosekologisiin tutkimuksiin tarvittiin nopea menetelmä kasvien lehtien määrän ja tiheyden mittaamiseksi. Virallisesti LAI:n mittaushistorian aloitusvuonna voidaan pitää vuotta 1947, jolloin Watson julkaisi menetelmän peltokasvien LAI:n mittaamiseksi käyttäen kasvillisuuden päälle aseteltavaa mittaushelikkoa (engl. point quadrat). LAI:n mittaaminen tapahtui painamalla pitkä neula mittaushelikon aukkojen läpi kasvillisuuteen ja laskemalla, montako lehteä neula keskimäärin lävisti mittaushelikon alalla.

Watsonin menetelmällä ei voitu kuitenkaan mitata korkeampien kasvien (kuten puiden ja pensaiden) LAI:ta. Varsinainen LAI:n mittauksen läpimurto tapahtui vuonna 1953, kun Monsi ja Saeki julkaisivat ensimmäisen matemaattisen mallin, joka kuvasi riippuvuuden kasvillisuuden fotosynteesin ja säteilyn kasvustossa vaimenemisen välillä. Monsin ja Saekin malli perustui Beerin

lakiin, joka kuvaa, kuinka säteily vaimenee ilmakehässä eksponentiaalisesti ilmakehän hiukkasten määrän kasvaessa. Kasvustoille sovellettuna kasvuston LAI voitiin laskea Beerin lain inversiolla, kun tiedettiin latvuston valonläpäisevyys ja oletamalla latvustoelementtien jakautuneen tilaan satunnaisesti. Beerin lakiin perustuen on kehitetty useita LAI:n mittausrakenteita.

Tuohon aikaan tutkijoita mietityttivät myös kasvien rakenteen ja toimintojen väliset yhteydet. Oli tarpeen kehittää menetelmiä, joilla voitiin tutkia esimerkiksi biomassan allokaatiota lehtiin tai runkoon. Ensimmäisenä niin sanotun 'putkimalliteorian' (engl. pipe model theory) esitti Shinozaki vuonna 1964. Putkimallin teoria nojaa puun allometriaan (ts. puun eri osien välisiin mittasuhteisiin), kuten esimerkiksi montako yksikköä pintapuuta tarvitaan ylläpitämään yksikköä (kuivaa) lehtibiomassaa tai paljonko puun rinnankorkeusläpimitan ja puun pituuden välinen suhde voi vaihdella.

Kutsun tässä kirjoituksessa Beerin lain inversioon perustuvia LAI:n mittausrakenteita 'optisiksi' ja putkimalliin perustuvia menetelmiä 'allometrisiksi' menetelmiksi. Vaihtoehtoisesti voitaisiin puhua epäsuorista optisista ja suorista allometrisista mittausrakenteista, eroteltuna sen mukaan, kosketaanko mittauksen aikana mitattavaan kohteeseen. Vaikka puiden allometriaan perustuvat menetelmät ovat paljon käytettyjä erilaisissa kasvillisuuden toimintaa kuvaavissa prosessimalleissa, keskityn tässä kirjoituksessa lähinnä optisiin menetelmiin, jotka ovat tavallisia erilaisissa metsien kaukokartoitussovelluksissa.

LAI ja boreaalisen havumetsän rakennepiirteet

Kasvit rakentavat oman arkkitehtuurinsa tuotosta optimoiden – lehtien tulee kerätä auringon energiaa talteen enemmän kuin mitä niiden ylläpito kuluttaa. Auringon korkeuskulma ja pilvisuus vaikuttavat maanpinnalle saapuvan säteilyn voimakkuuteen ja säteilyn suuntajakaumaan. Tätä taustaa vasten onkin helppo ymmärtää, miksi eri leveysasteiden (vrt. trooppinen ja boreaalinen kasvillisuusvyöhyke) puiden rakenne ja latvusarkkitehtuuri eroavat toisistaan. Boreaalisisä havumetsissä tropiikin litteät lehdet ovat korvautuneet konvekseilla neulasilla ja rakenteellista ryhmittymistä ilmenee useilla tasoilla: neulaset ovat ryhmittyneet versoiksi, yksittäiset versot ovat järjestäytyneet oksien ympärille, ja oksat ovat ryhmittyneet puun runkojen ympärille. Myös lehtipuiden (esim. koivut, *Betula* spp.) lehtien voidaan ajatella ryhmittyneen oksa- ja puutasolla.

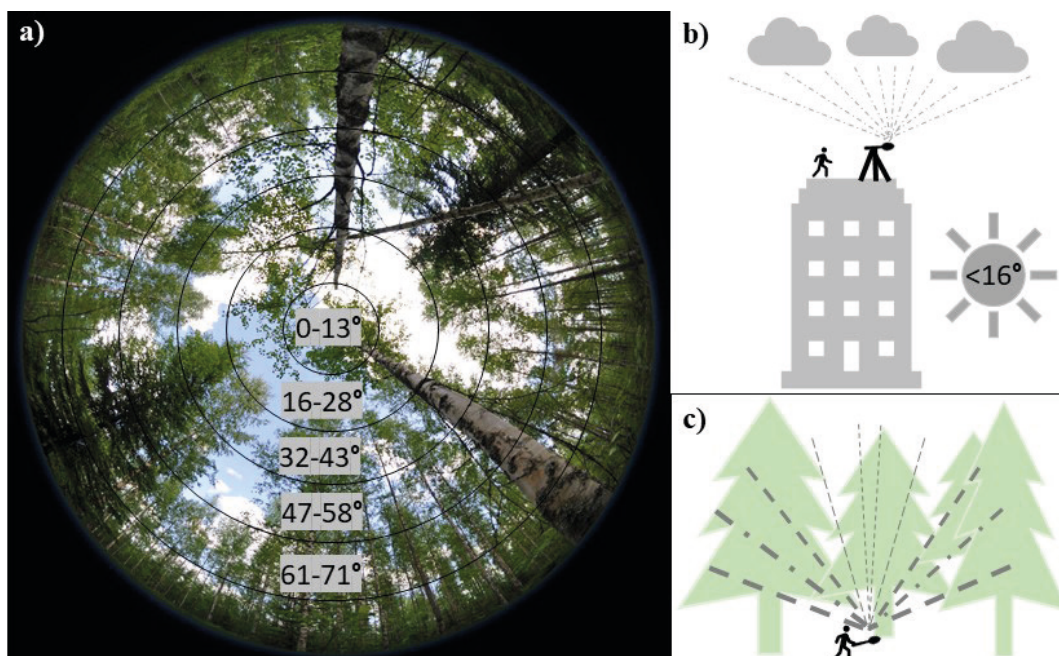
Siinä missä tropiikin puiden kannattaa kasvattaa lehtensä horisontaalisesti kapeaksi kerrokseksi (ts. ylhäältä paistava aurinko maksimoi valonsidonnan), on boreaalisisä alueella puille kannattavampaa asemoida lehtensä vertikaalisesti ja kasvattaa useampia kerroksia puun eri korkeuksille (ts. matalan auringonkulman vuoksi iso osa säteilystä saapuu sivusuunnasta, jolloin pitkä ja kapea latvusmuoto optimoi valonsidonnan). Lisäksi suuren hajasäteilyn määrän on havaittu kasvattavan syvällä kasvustossa olevien varjoneulasten ja -versojen fotosynteesinopeutta, koska säteily jakautuu neulaspinnaalle tasaisemmin. Boreaalisisä puille tyypillinen kapea (ts. 'syvä') latvusmuoto sallii runsaan metsän aluskasvillisuuden kehittymisen, sillä kapeiden puidenlatvusten väleistä auringon valoa pääsee siirtymään metsänpohjalle.

Versotason ryhmittymisen etuna on, että yksittäiset versot toimivat kuin katiskat – auringosta maahan saapuneiden fotonien on vaikea paeta jouduttuaan verson sisään. Verson katiskamainen fotonien sidonta johtuu verson neulasten välillä tapahtuvasta monisironnasta. Kaikki versot eivät kuitenkaan ole keskenään samanlaisia, sillä versojen rakenne vaihtelee sekä saman latvuksen sisällä (ts. riippuu ympäröivästä valo-olosuhteista) että eri puulajien välillä. Versojen ryhmittymisyyden astetta voidaan mitata niin sanotulla verson STAR-arvolla (engl. Silhouette to Total Area Ratio), joka kuvaa projisoidun versosiluetin (lasketaan kaikkien tarkastelusuuntien keskiarvona) ja projisoidun neulasalan suhdetta. Koska verson neulaset varjostavat toisiaan, on verson siluettiala aina pienempi kuin neulasten yhteenlaskettu projektioala. Tämä tarkoittaa, että lähtökohtaisesti kaikki

optiset mittaussuunnitelmat aliarvioivat havumetsän LAI:ta. Aliarvioitua LAI:ta kutsutaan efektiiviseksi LAI-arvoksi erotuksena todellisesta LAI-arvosta. Versotason ryhmittymiskorjaus on havaittu tehokkaaksi tavaksi korjata mitattuja LAI-estimaatteja lähemmäs todellisia LAI-arvoja.

Optiset LAI:n maastomittausmenetelmät

Koelan LAI:ta voidaan mitata esimerkiksi LAI-2000 (LAI-2200C) Plant Canopy Analyser -laitteella tai kalansilmälinsillä (ts. koko ylemmän puoliavaruuden kattava hemisfäärilinssi) otetuista valokuvista. LAI-2000 laite mittaa sinisellä aallonpituudella (320–490 nm) taivaalta saapuvaa hajasäteilyä käyttäen viittä zenitiin suunnasta avautuvaa kehää, joiden keskikulmat ovat 7° , 23° , 38° , 53° ja 68° (Kuva 1a). Mittaukset tehdään auringon korkeuskulman ollessa alle 16° (ts. linssiin ei saa saapua suoraa säteilyä) tai kun taivas on tasaisen pilvinen (ts. säteilyllä ei ole suuntajakaumaa, vaan sitä saapuu diffuusisti kaikista suunnista). LAI-2000-mittaukset voidaan suorittaa joko yhdellä tai kahdella LAI-2000-laitteella. Kahdella LAI-2000-laitteella mitattaessa toinen LAI-2000-laite jätetään mittaamaan latvuston yläpuolella olevaa taivaan säteilykenttää, ja samanaikaisesti toisella LAI-2000-laitteella tehdään mittauksia latvuston alapuolella (Kuva 1b,c). Latvuston yläpuolella mittaava LAI-2000-laite (ns. referenssisensori) tulee asentaa niin, että sensorin näkökenttään jää vain taivasta (ts. laitteen voi asentaa mahdollisuuksien mukaan mittaustorniin, korkean talon katolle tai avoimen pellon keskelle). Latvuston alapuolella käytettävän LAI-2000-laitteen kanssa mittaukset suoritetaan käyttäen ennalta määrättyä otantakuviota. LAI-2000-laite laskee latvusrakennetta kuvaavat parametrit, kuten zenittikehittäiset aukkoisuudet ja LAI:n, perustuen Beerin lakiin yhdistämällä latvuston ala- ja yläpuolelta mitatut aineistot.



Kuva 1. Hahmotelma optisen LAI:n maastomittauksista LAI-2000-laitteella. Kuvassa a) näkyy LAI-2000-laitteen zenitirinkien avauskulmat ja taustana on kalansilmälinsillä otettu valokuva. Kuvissa b) ja c) näkyy LAI-mittauksien periaate käyttäen kahta LAI-2000-laitetta: Kuvassa b) on LAI-2000-referenssisensori, joka mittaa taivaan hajasäteilyä sillä välin, kun c) toisella LAI-2000-laitteella tehdään mittauksia latvuston alapuolella.

Kalansilmäläinillä LAI:n mittaukset tulee myös suorittaa diffuusien säteilyolojen aikana. Kuvia otettaessa voi olla vaikea ennalta tietää, minkälainen valotusasetus maksimoi kontrastin taivas- ja latvus-pikseleiden välillä, joten kuvia voi ottaa eri asetuksilla. Kalansilmäkuvat kannattaa tallentaa raakakuvaformaattissa, joka mahdollistaa monipuolisemman kuvien jatkokäsittelyn. Kalansilmäkuvauksessa käytetään ennalta määrättyä otantakuviota samoin kuin LAI-2000-laitteen kanssa. LAI:n laskeminen kuvilta tapahtuu jälkikäsitteilyvaiheessa tietokoneella, joten esimerkiksi laskennassa käytettävän taivasalan kokoa voidaan muuttaa (avauskulman maksimi yleensä 180°). Kalansilmäkuvien prosessoimiseksi on kehitetty useita tietokoneohjelmia, joiden avulla voi kuvilta laskea LAI:n lisäksi esimerkiksi latvuspeiton ja latvuston zenittikulmittaiset aukkoisuudet.

LAI:ta voidaan arvioida myös maastolaserkeilausaineistoilta perustuen joko Beerin lakiin tai geometriseen mallinnukseen. Laserkeilausaineistoissa etäisyyden mittaaminen perustuu lasersäteiden matka-aikaan mitattavan kohteen ja sensorin välillä, ja Beerin lakiin perustuen LAI voidaan laskea samoin kuin optisen LAI:n maastomittausmenetelmien tapauksessa. Beerin lain soveltamiseksi tarvittava tieto latvuston aukkoisuudesta lasketaan laserkeilaimen lähettämien pulssien maasta, rungoista, oksista ja latvuksista heijastuneista paluukaiuista. Vaihtoehtoisesti latvuston voidaan ajatella koostuvan 'kuutiopilasta' (engl. voxel grid), jonka kuutioiden lehtialatiheyden annetaan vaihdella latvuston eri osissa. Geometrisen mallinnuksen avulla paluukaiuista voidaan rekonstruoida sekä puiden runkoja, oksia että latvuksen ominaisuuksia, kuten LAI. On huomionarvoista, että vaikka maastolaserkeilauksen avulla saadaan tarkkaa tietoa yksittäisistä puista (ja erityisesti puiden rungoista), ei tietoa juurikaan saada kerättyä puiden latvuksien ylimmistä osista. Puiden latvusten kolmiulotteinen kuvaus voi myös osoittautua haastavaksi tiheissä metsissä, joissa on suuri LAI, sillä lähempänä laserkeilainta olevat latvukset peittävät takanaan olevat latvukset. Kuutiopilasta käyttäen LAI:n arvioinnissa rajoittavat poikkeamat teoreettisista oletuksista (kuten se, että maastolaserin oletetaan lähettävän loputtomasti äärimmäisen pieniä laserpulseja jokaisen kuutiopilasolun läpi). Todellisuudessa lasersäteiden määrä ei ole loputon eivätkä laserpulssit ole äärettömän pieniä, mikä johtaa kaikkien epätasaiseen jakautumiseen eri puolilla latvusta. Tämä vaikeuttaa kuutiopilasolujen koon määrittämistä. Maastolaserkeilauksen etuna on, että esimerkiksi puuaineesta ja vihreästä kasvillisuudesta palaavat kaiut voidaan erottaa toisistaan huomattavasti tarkemmin kuin esimerkiksi kalansilmäkuvilta. Lisäksi laseraineistoista voidaan arvioida LAI:ta puuston eri korkeuksilla, joka ei onnistu muiden optisten LAI-mittauslaitteiden aineistoista.

Optisesti mitatut LAI-arvot vastaavat havumetsissä niin sanottua efektiivistä LAI:ta, joka aliarvioi todellista LAI-arvoa muun muassa versotason ryhmittymisen vuoksi (ts. Beerin lain vaatima oletus latvustoelementtien satunnaisista sijainneista ei täyty). Metsän todellinen LAI voidaan laskea esimerkiksi säteilyn siirtymistä kasvustoissa simuloivien mallien avulla. Säteilymallien parametrisointi voidaan toteuttaa esimerkiksi LAI-2000-laitteen mittaamien aineistojen avulla, joita voidaan täydentää esimerkiksi tiedoilla puulajista ja puuston tilajärjestyksestä. Yksinkertaisin (ja tehokkain) tapa korjata efektiivistä LAI:ta lähemmäs todellista LAI:ta on käyttää versotason ryhmittymiskorjausta.

Allometriset LAI:n maastomittausmenetelmät

Allometriaan perustuvien lehtibiomassamallien kehittäminen on työlästä ja aikaa vievää, sillä mittauksia pitää tehdä puutasolla. Allometrisia LAI:n mittauksia kutsutaan tuhoaviksi menetelmiksi, sillä mittauksia tehtäessä mittausten kohde kirjaimellisesti tuhoutuu. Puun LAI:n estimointi vaatii, että tiedetään yhden puun lehtibiomassa ja niin sanottu 'spesifinen lehtiala-arvo' (engl. specific leaf area), joka kuvaa lehtialan (m²) ja kuivan lehtibiomassan (kg) suhdetta. Puun lehtibiomassan mittaaminen vaatii, että puu kaadetaan ja puun lehdet kerätään, kuivataan ja punnitaan. Vaihtoehtoi-

sesti lehtibiomassan mittaauksessa voidaan käyttää otantaa, jolloin vain osa puun lehdistä kerätään, kuivataan ja punnitaan. Lisäksi puusta täytyy kerätä edustava otos lehtiä, joiden spesifinen lehtiala mitataan. Litteiden lehtien pinta-alan saa mitattua tavallisella skannerilla, sillä lehdet voidaan olettaa äärettömän ohuiksi. Havupuiden neulasten tapauksessa joudutaan mittaauksessa huomioimaan neulasten kolmiulotteinen rakenne, ja neulasten pinta-ala mallinnetaan neulasen geometria huomioiden (esimerkiksi suuntaissärmiönä). Koska lehtien ja neulasten koko ja rakenne vaihtelee iän ja latvuston valo-olosuhteiden vuoksi, joudutaan lehtiä ja neulasia keräämään latvuston eri osista edustavan keskiarvon laskemiseksi. Tilastollisten mallien kehittämiseksi tulisi mittaauksia tehdä eri kokoisista puista kattaen koko maantieteellinen alue, jota kehitetyn mallin halutaan edustavan. Suomessa valtakunnan metsien inventoinnin käyttämät lehtibiomassamallit perustuvat kansallisiin aineistoihin, joten ne sopivat käytettäväksi myös maan eri osissa. Allometrisia lehtibiomassamalleja voidaan käyttää koealatasolla esimerkiksi niin, että ennustetaan rinnankorkeusläpimitaltaan mediaani puun lehtibiomassa, joka kerrotaan puuston tiheydellä. Kehittyneimmissä malleissa puun lehtibiomassa voidaan ennustaa perustuen puun rinnankorkeusläpimittaan, pituuteen ja latvuspituuteen. Kansainvälisesti on saatavilla paljon erilaisia lehtibiomassamalleja niin eri puolajaille kuin maantieteellisille alueille. Spesifisiä lehtiala-mittauksia on saatavilla huomattavasti vähemmän kuin lehtibiomassamalleja.

Käytännön näkökulmia LAI:n maastomittausten toteutukseen

LAI:n maastomittauksia voidaan käyttää sekä koealatasolla tutkittaessa esimerkiksi metsän sisäisiä valo-olosuhteita ja maastoreferenssiaineistona kehitettäessä uusia kaukokartoitusmenetelmiä. Optisten tai allometristen menetelmien paremmuus riippuu tutkimuskysymyksestä (Taulukko 1). Keskityn tässä kirjoituksessa lähinnä optisiin menetelmiin, sillä ne ovat kasvillisuuden kaukokartoitustyössä useimmin käytetty menetelmä. Optiset menetelmät ovat suoraan sovellettavissa LAI:n vuodenaikasseurantaan, ja ne soveltuvat myös käytettäväksi prosessipohjaisten kasvillisuuden kehitystä simuloivien mallien pohjana. Koealataso LAI-mittausten maastoresoluutio vastaa kutakuinkin keskiresoluution satelliittiaineistoja (esimerkiksi Landsat 8 OLI -sensorin maaresoluutio on $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$), jonka vuoksi paljon LAI:n kaukokartoitusmenetelmiä on kehitetty keskiresoluution optisille satelliittiaineistoille. Keskiresoluution satelliittiaineistojen kautta voidaan koealataso LAI-mittauksia myös yleistää laajemmille alueille, jolloin voidaan arvioida esimerkiksi globaalien matalan maaresoluution ($1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$) LAI-tuotteiden todenmukaisuutta.

Maastomittausten suunnittelussa on hyvä ensin miettiä, mikä on tutkittavan koealan koko ja kuinka tarkkaan LAI:ta oikeastaan pitää arvioida. Näiden kahden vastauksen pohjalta voidaan lähteä suunnittelemaan LAI-mittausten maasto-otanta. Suunnittelua voidaan pitää vaihtokauppana mitattavien koealojen lukumäärän ja mitattujen LAI-arvojen tarkkuuden välillä. Kaukokartoitussovellusten tapauksessa myös koealojen maantieteellinen jakautuminen tulisi huomioida. Joidenkin sovellusten kannalta voi olla kannattavampaa mitata kymmeniä (tai satoja) koealoja hieman alemmalla tarkkuudella sen sijaan, että keskittyisi muutaman koealan perusteellisiin mittauksiin. Esimerkiksi, jos tarkoitus on validoida maaresoluutioltaan $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ LAI-tuotteita, on tällöin parempi suunnata resursseja koealojen määrään ja niiden maantieteelliseen sijoitteluun. Jos taas tutkimuksen tarkoituksena on tuottaa tietoa esimerkiksi säteilyn siirtoa kasvustossa simuloivan fysikaalisen mallin tarpeisiin, on parempi keskittyä mittaamaan yksityiskohtaisesti yksittäisiä koealoja. Tutkimuksien mukaan keskiresoluution satelliittiaineistojen pikselikokoa vastaavalla koealan koolla voidaan käyttää kahtatoista satunnaisesti sijoitettua LAI:n mittauspistettä keskivirheen vakiinnuttamiseksi alle 0,15 LAI-yksikköön. Vaihtoehtoisesti LAI:n mittauspisteet voidaan asetella systemaattisesti, jolloin keskivirhe putoaa 0,06 LAI-yksikköön ja variaatiokerroin putoaa

Taulukko 1. LAI:n mittauksessa, mallinnuksessa ja arvioinnissa käytettävien menetelmien vertailu. 'Optinen' tarkoittaa Beerin lakiin perustuvia maastomittausmenetelmiä, 'Allometrinen' tarkoittaa puiden eri rakennekomponenttien suhteelliseen kokoon perustuvia maastomittausmenetelmiä, 'Satelliittikuva' viittaa optisten keskiresoluution satelliittiaineistojen käyttöön, ja 'Lentolaserkeilaus' kuvaa harvapulssisten aluepohjaisten laserkeilausaineistojen käyttöä. Huomaa, että optisia satelliittikuvia tai lentolaserkeilausaineistoja hyödyntävien menetelmien kehitys vaatii usein tuekseen optisia tai allometrisia maastoaineistoja, joten ne eivät ole muista riippumattomia menetelmiä. Luokittelu on tarkoituksellisesti yleistävä ja kuvaa kirjoittajan tämänhetkistä näkemystä.

Vertailukohta	Optinen	Allometrinen	Satelliittikuva	Lentolaserkeilaus
Koealan LAI:n mittaaminen	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä
Sopii laajoille alueille	ei	ei	kyllä	kyllä
Voidaan käyttää koko Suomen LAI:n arviointiin	ei	kyllä	kyllä	kyllä
Parametrisointi metsätietokannasta	ei	kyllä	toisinaan*	ei
LAI:n vuodenaikaisvaihtelun seuranta	kyllä	ei	kyllä	ei
Herkkä aluskasvillisuuden LAI:lle	ei	ei	kyllä	ei
Herkkä mittaushetken sääolosuhteille	kyllä	ei	toisinaan	ei
Metsämallien parametrisointi	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä
Terveydentilan seuranta	kyllä	ei	kyllä	toisinaan**

* esim. koneoppimismenetelmien kautta, ** esim. paha harsuuntuminen tai tuulenkaadot

alle 0,03 LAI-yksikön. Yleisimmin käytetty tapa on sijoittaa LAI:n mittauspisteet systemaattisesti esimerkiksi ristin muotoon, niin että mittauspisteet ovat ristin keskellä kahdeksan metrin päässä toisistaan ja muuten neljän metrin päässä toisistaan. On huomionarvoista, että koska optisten mittauslaitteiden mittaukset tehdään käyttäen laajan näkökentän linsejä, mittaavat lähekkäin olevat mittauspisteet osittain samoja latvuston kohtia. Yksittäisten mittauspisteiden välillä onkin vahva autokorrelaatio, joka aiheuttaa, ettei mittauspisteiden lisääminen loputtomasti paranna mittaustarkkuutta. Mittauspisteiden välisen autokorrelaation ansiosta voidaan erirakenteisissa ja eri puulajin metsiköissä kuitenkin käyttää melko pientä mittauspistemäärää, mikä nopeuttaa maastomittausten suorittamista. On myös huomionarvoista, että koska optiset mittaukset tulee tehdä diffuusien säteilyolojen aikana, ei mittauksia ole useinkaan mahdollista toteuttaa tavallisten työaikojen puitteissa. Esimerkiksi Tampereen alueella heinäkuun ensimmäisenä päivänä auringon korkeuskulma on välillä 0°–16° (ts. sopii LAI-2000-laitteelle) aamuyöllä välillä 03:49–6:53 ja illalla 20:05–23:08.

LAI-mittauksia voidaan tehdä läpi koko kasvukauden, jolloin voidaan seurata esimerkiksi lehtien puhkeamista ja varisemista, mutta yleisesti mittaukset ovat keskittyneet keskikesään, jolloin kasvillisuus on vihreimmillään. Lisäksi tulee huomioda, että optiset mittalaitteet eivät useinkaan erottele esimerkiksi puiden runkoja ja oksia vihreästä lehvästä (ts. mittaukset eivät tarkalleen ottaen vastaa LAI:ta, vaan ns. kasvialaindeksiä engl. 'Plant Area Index'). Lehdettömään aikaan kesävihantia puita mitattaessa LAI:n asemesta mittaaminen vastaa puun runkojen ja oksien alaindeksiä (engl. 'Wood Area Index'). Lehtialan määrän kasvaessa rungoista ja oksista aiheutuva virhe LAI-arvoon kuitenkin pienenee, sillä runkojen takana olisi kuitenkin lehtiä. Ikivihantien havupuiden LAI:ta voidaan mitata vuoden ympäri.

Kalansilmäkuvien etu LAI-2000-laitteeseen verrattuna on, että kuvia voidaan analysoida eri tavoilla jälkikäteen. Kalansilmäkuvalta voidaan arvioida esimerkiksi runkojen vaikutusta mitattavaan LAI:hin tai koealan puulajisuhdetta, joiden analysointi ei ole jälkikäteen mahdollista LAI-2000-aineistoista. Kalansilmäkuvien prosessointi vaatii käyttäjältään huomattavasti enemmän asiantuntemusta kuin LAI-2000-laite, joten luotettavien tuloksien saaminen on kuitenkin haastavampaa kuin LAI-2000-laitteella (ts. LAI-2000-laitteen LAI on vähemmän riippuvainen käyttäjästä). Kalansilmäkuvien ongelmana voidaankin pitää työlästä esikäsittelyä, jota ei ole useinkaan kuvattu tutkimusartikkeleissa kovin tarkasti (ts. ei tiedetä, miten LAI-arvoon on lopulta päädytty).

Allometriset lehtibiomassamallit ovat erittäin hitaita ja työläitä kehittää, ja siksi mallit usein edustavat maantieteellisesti hyvin rajatun alueen puuyksilöitä. On tärkeää tiedostaa, että vaikka periaatteessa yksittäisille puille voidaan määrittää LAI, on LAI tosiasiallisesti metsikkömuuttuja, joka tarkoittaa, että allometrisen LAI:n laskenta on aina suoritettava koelatasolla. Valmiiden lehtibiomassamallien käyttö on kuitenkin helppoa, sillä esimerkiksi valtion metsien inventoinnin käyttämät lehtibiomassamallit voidaan parametrisoida suoraan metsikkökoelatan inventointitietojen pohjalta (ts. malleja voidaan käyttää metsätietokannan kanssa). Vaikka näin saatavien lehtibiomassa-arvioiden tarkkuus voi olla heikko yksittäisten koelajien tapauksessa, toimivat mallit sitä paremmin, mitä isommalle alueelle malleja käytetään (ts. näin tapahtuu, kun mallien taustalla oleva aineisto on kansallisella tasolla edustava). On kuitenkin huomionarvoista, että siinä missä tavalliset allometriset lehtibiomassamallit eivät ole herkkiä ilmastotekijöille, on esimerkiksi puiden allometriaan perustuvien prosessimallien kautta mahdollista huomioida ympäristössä tapahtuvien muutosten vaikutusta kasvuun. Kuitenkin esimerkiksi metsän fotosynteesin arvioimiseksi tulisi lehtibiomassan (tai LAI:n) lisäksi osata arvioida myös metsän latvuksen aukkoisuutta, sillä boreaalisten metsien latvusrakenteella on huomattavan iso vaikutus metsän latvuksen sitomaan auringon energiaan. Näin ollen tutkimustavoitteesta riippuu, kannattaako tutkimus perustaa optisen vai allometrisen LAI:n varaan.

LAI:n arviointi kaukokartoitusaineistoilta

LAI:ta voidaan arvioida sekä optisilta satelliittikuvilta että aktiivisesti tuotetuista kaukokartoitusaineistoista, kuten lento- tai maastolaserkeilaus. Erilaisten kaukokartoitusaineistojen kautta voidaan vastata erilaisiin LAI:n arviointia koskeviin tutkimuskysymyksiin, joten mikään LAI:n kaukokartoitusmenetelmä ei itsessään ole toista parempi. Keskityn tässä kappaleessa kertomaan LAI:n arviointimenetelmistä optisilta satelliittikuvilta ja lentolaserkeilausaineistoista, sillä näiden aineistojen kautta voidaan tuottaa esimerkiksi kansallisen tason LAI-karttoja. LAI:n kaukokartoituksen historiaa ja optisen kaukokartoituksen fysikaalista taustaa on kuvattu myös [Metsätieteen aikakauskirjassa aiemmin](#) julkaistussa kirjoituksessa.

Optisten satelliittiaineistojen LAI-tulkinta voi yksinkertaisimmillaan nojata satelliittikuvan pikseleiden sävyarvojen tai heijastussuhteiden ja maastokoelajien LAI:n välille sovitettuun regressiomalliin, jonka avulla voidaan laskea LAI satelliittikuvan muille pikseleille. Ideaalisesti satelliittikuva ja maastoaineistot olisi mitattu mahdollisimman samaan aikaan, jotta ne kuvaisivat samaa kasvillisuuden hetkeä. Yksinkertaisten empiirisiin aineistoihin perustuvien mallien ongelmana on kuitenkin, ettei sovitettu malli välttämättä tuota tarkkoja LAI-arvoja toisena ajanhetkenä otetulle satelliittikuvulle (esim. poikkeavien ilmakanavien olosuhteiden vuoksi). Sovitettua mallia ei yleensä voida myöskään käyttää toiselta maantieteelliseltä alueelta otetulle satelliittikuvulle, jos ei voida olla varmoja, riittääkö käytettyjen maastokoelajien LAI:n (ja metsän rakenteen) vaihtelu edustamaan satelliittikuvalla havaittua vaihtelua. Vaihtoehtoisesti voidaan LAI:n tulkintaan käyttää esimerkiksi semi-empiirisiä menetelmiä tai fysikaalisia malleja. Semi-empiiriset menetelmät tarkoittavat tässä fysikaaliseen ilmiöön perustuvia regressiomalleja, joiden kautta lasketut tulokset ovat empiirisiin menetelmiin perustuvia regressiomalleja helpommin yleistettävissä. Semi-empiiriset mallit voivat perustua esimerkiksi kasvillisuusindekseihin, jotka muodostetaan yhdistelminä satelliittisensorin eri aallonpituuksilla mittaamista spektrisistä kanavista. Kuten empiiriset menetelmät, myös semi-empiiriset menetelmät voivat olla hankalia yleistää, sillä esimerkiksi kanavien aallonpituusalueet vaihtelevat eri satelliittisensorien välillä. Fysikaalisten mallien avulla satelliittisensorin mittaama heijastussignaali voidaan invertoida kasvillisuuden ominaisuuksia ja rakennetta (kuten LAI) kuvaaviksi biofysikaaliksi muuttujiksi. Fysikaalisten menetelmien etuna on mallien yleistettävyyden, sillä

ne eivät ole sidottuja yksittäisten satelliittisensoreihin kanavien ominaisuuksiin tai maantieteellisiin alueisiin. Fysikaalisten menetelmien kehitystyön ongelmana on kuitenkin mallien vaativuus. Lisäksi useiden rakenteellisten ja kemiallisten tekijöiden summa voi aiheuttaa samanlaisen heijastussignaalin, jonka vuoksi inversion tuloksen oikeellisuudesta ei aina voida olla varmoja.

Vaihtoehtoisesti metsän latvuksen LAI:ta voidaan arvioida lentolaserkeilausaineistojen avulla. Laserkeilausaineistoista LAI voidaan laskea perustuen Beerin lakiin, ja latvuston aukkoisuustieto lasketaan laserkeilaimen lähettämien pulssien paluukaiuista. Latvuston aukkoisuuden arviointiin on eniten käytetty ACI-indeksiä (engl. All Echo Cover Index), joka lasketaan huomionden kaikki referenssikorkeuden (yleensä 1,3 m) yläpuolelta heijastuvat kaiut. On kuitenkin huomionden arvoista, että ACI-indeksin kautta laskettu LAI ei suoraan vastaan esimerkiksi LAI-2000-laitteen mittaamaa LAI:ta, sillä lentolaserkeilauksessa mittaukset tehdään käyttäen verrattain kapeaa avausmittauskulmaa (esim. 20°, kun LAI-2000-laitteen avauskulma on 150°). Laserkeilauksella tuotettuja LAI-arvioita voidaan kalibroida vastaamaan maastossa mitattuja LAI-arvoja, tai vaihtoehtoisesti LAI voidaan laskea käyttäen valmiiksi kalibroituja ACI-indeksiin perustuvia regressiomalleja. Lentolaserkeilauksella tuotetuista pistepilvistä voidaan myös rekonstruoida yksittäisiä latvuksia ja latvusryhmiä käyttäen esimerkiksi erilaisia kolmiointialgoritmeja. Maastossa mitattuja LAI-arvoja voidaan käyttää myös kolmiointialgoritmien kalibrointiin, jotta kolmioinnilla tuotettavien latvusten sisäinen lehtialatiheys vastaisi mahdollisimman hyvin maastossa mitattua.

LAI:ta voidaan arvioida myös satelliittilasermittauksiin perustuen. Esimerkkinä satelliittilasermittauksia tekevstä sensorista on NASA:n GLAS, joka on asennettu ICESat-1-satelliittiin. Satelliittilaseraineistojen suurimpana erona optisiin satelliittikuviin on, että satelliittilaser tekee kaistoittaisia korkeusmittauksia. GLAS:n mittaamien kaistojen etäisyys on päiväntasaajalla ~30 km, ja kaistoilta mitataan koealoja 170 metrin välein (koealojen läpimitta on ~65 m). Johtuen satelliittilaseraineistojen otannan harvuudesta ei näiden aineistojen avulla ole mahdollista tuottaa maantieteellisesti jatkuvia aineistoja, mikä rajoittaa niiden käyttöä LAI:n kartoituksessa. Optisten satelliittikuvien avulla satelliittilaserin mittaamien LAI-koealojen tulokset voidaan kuitenkin yleistää laajemmille alueille. Huomionden arvoista on, että satelliittilaseraineistojen avulla voidaan mitata tiheiden trooppisten sademetsien LAI:ta, jonka arviointi optisilta satelliittikuvilta on vaikeaa. Satelliittilaseraineistojen etuna optisiin satelliittikuviin on, että LAI-koealoja saadaan mitattua globaalisti, eivätkä aineistot ole herkkiä signaalin saturoitumiselle, pilville, varjoille tai kasvillisuuden heijastusominaisuuksille.

Optisilta satelliittikuvilta LAI:ta arvioitaessa tulee huomioida, että arvioitava LAI sisältää myös metsänpohjan LAI:n, sillä puiden välissä olevien aukkojen kautta satelliittisensori 'näkee' myös metsänpohjan. Aluskasvillisuuden LAI:n vaikutus satelliittikuvalta arvioitavaan LAI:hin on sitä suurempi, mitä pienempi metsän latvuksen LAI on. Fysikaalisten säteilymallien avulla olisi mahdollista kehittää menetelmiä myös aluskasvillisuuden LAI:n arviointiin, mutta vielä tällaisia tuotteita ei ole operatiivisesti saatavilla. Optisia satelliittikuvia on saatavilla vuoden ympäri kaikille maa- ja meri-alueille ja uusia mittauksia saadaan lisää jatkuvasti. Optisten satelliittikuvien pohjalta onkin mahdollista tutkia esimerkiksi kasvillisuuden vuodenvaihtelua ja terveydentilaa. Satelliittiaineistoista on myös mahdollista koostaa useiden vuosikymmenten pituisia aikasarjoja, joita voidaan käyttää esimerkiksi muutostulkintaan.

Vaikka lentolaserkeilausaineistojen pohjalta voidaan tehdä optisiin satelliittikuviin nähden ylivertaisen tarkkaa koealatasen LAI-analyysiä ja arvioida metsän puuston korkeuteen ja tiheyteen vaikuttavia puustotunnuksia, ei aineistojen saatavuus kansainvälisesti ole kovin hyvä. Suomessa lentolaserkeilausaineistoja on kuitenkin saatavissa suhteellisen hyvin. Lentolaserkeilausaineistoja on saatavilla tavallisesti vain rajatuille maantieteellisille alueille, mittauskertoja on tyypillisesti yksi, ja se voi olla tehty keväällä tai kesällä. Tätä taustaa vasten on helppo ymmärtää, ettei lentolaserkeilausaineisto ole parhaimmillaan esimerkiksi LAI:n aikasarja-analyysiin, LAI:n muutostulkintaan

tai laaja-alaisten LAI-karttamosaiikkien tekoon. Borealisella alueella optisten satelliittikuvien isoimpana ongelmana voidaan pitää pilviä, jotka peittävät mitattavan kasvillisuuden. Myös muut ilmakehässä tapahtuvat muutokset voivat heikentää satelliittikuvien laatua, sillä esimerkiksi ilmakehäkorjaus vaikuttaa suoraan aineiston laatuun ja mittausten luotettavuuteen. Sekä optisilta satelliittikuvilta mitattu LAI että laserkeilausaineistosta laskettu LAI vastaavat borealisissa havumetsissä efektiivistä LAI:ta, joten molemmille aineistotyypeille voidaan tehdä versotason ryhmittymiskorjaus.

Globaalit optisiin satelliittikuviin perustuvat LAI-tuotteet

Globaalisti operatiivisia LAI-tuotteita on ollut saatavilla jo yli 20 vuotta (Taulukko 2). Tuotteiden laskentaan käytetään joko fysikaalisia malleja tai hermoverkkoihin perustuvia koneoppimismenetelmiä. Esimerkkinä fysikaalisen mallin käytöstä on Yhdysvaltain avaruushallinto NASA:n MODIS-satelliittisensorin LAI-tuote, jolla on 500 m × 500 m maaresoluutio. Uusi LAI-tuote koostetaan aina viimeisen kahdeksan päivän ajalla mitatuista aineistoista. Atlantin tällä puolen Euroopan unionin maanhavainnointiohjelma Copernicus on sitä vastoin käyttänyt LAI-tuotteidensa pohjana hermoverkkoja. Huomionarvoista on, että Copernicus on käyttänyt LAI-tuotteidensa tekemiseen useampien satelliittisensorien aineistoja (Taulukko 2), minkä vuoksi LAI-tuotteen resoluutio on muuttunut vuoden 2014 jälkeen 1 km:n tasolta 1/3 km:n maaresoluutioon. Copernicuksen LAI-tuotteilla on myös hieman pidempi ajallinen resoluutio kuin NASA:n LAI-tuotteella. Yhdysvaltain kansallinen valtamerien ja ilmakehän hallinto NOAA ja NASA ovat yhdessä tuottaneet VIIRS LAI -tuotetta jo vuodesta 2012. VIIRS LAI -tuotteen tarkoitus on taata LAI-tuotteiden jatkuvuus myös MODIS-aikakauden jälkeen, ja se lasketaankin samalla fysikaalisella mallilla kuin MODIS LAI. NOAA on tuottanut vuodesta 2000 lähtien myös omaa AVHRR LAI -tuotettaan. AVHRR LAI -tuotteella on muihin globaaleihin LAI-tuotteisiin nähden todella karkea maaresoluutio (~5 km × ~5 km), mutta LAI-aineistoja saadaan päivittäin, toisin kuin muiden LAI-tuotteiden kohdalla.

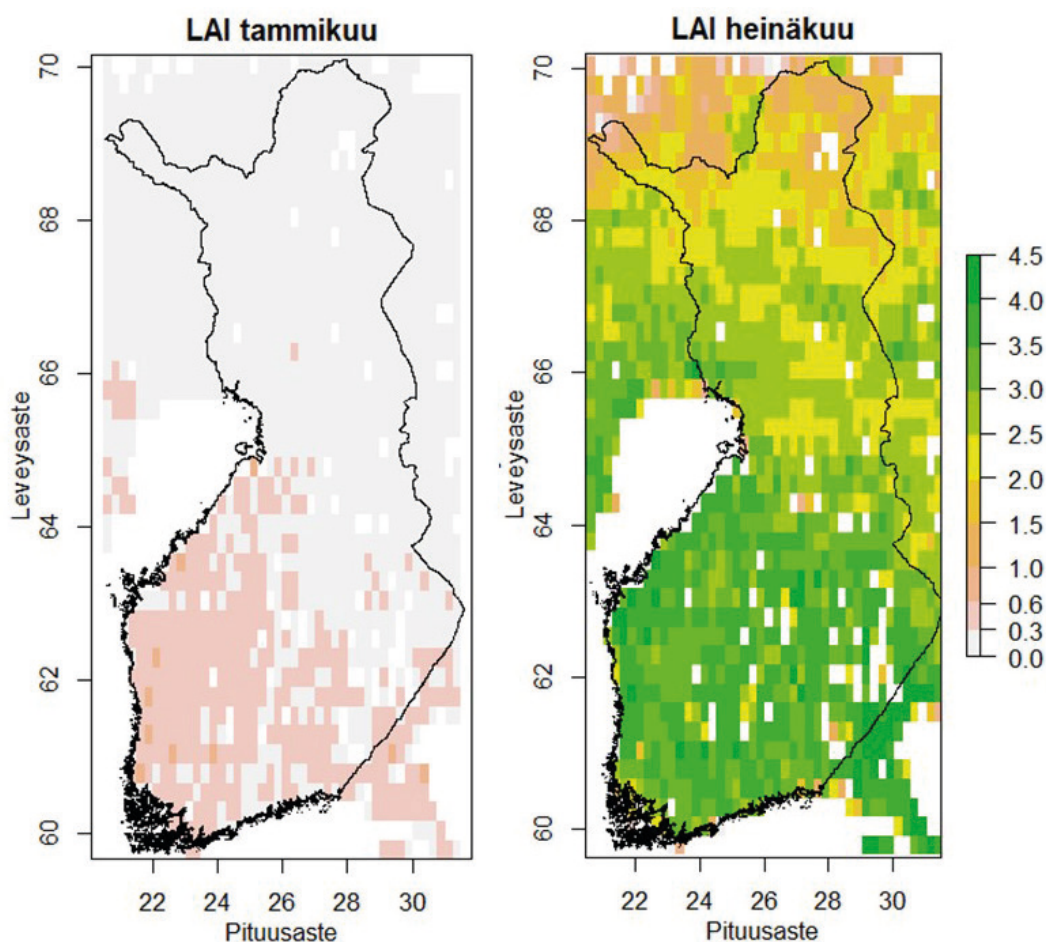
Myös Sentinel-3-satelliittisensorin LAI-tuote (maaresoluutio 300 m × 300 m) julkaistiin vuonna 2020, mutta koska tässä LAI-tuotteessa havaittujen anomalioiden korjaus on tällä hetkellä vielä työn alla, ei tuote ole vielä operatiivisesti saatavilla. Globaaleja optisiin satelliittikuviin perustuvia LAI-karttoja voidaan tuottaa nykyään myös keskiresoluution satelliittiaineistoista. Esimerkiksi Sentinel-2-satelliittikuville (joiden maaresoluutio vaihtelee välillä 10 m × 10 m ja 60 m × 60 m) LAI voidaan laskea itse käyttäen avoimesti saatavilla olevaa SL2P-nimistä prosessoria (saatavilla SNAP-työkalupakin kautta). SL2P-prosessorin LAI:n laskennassa käytetään sekä hermoverkkoja että fysikaalista mallia. En listaa tätäkään LAI-tuotteeksi, koska sen prosessointi on osattava tehdä itse.

Taulukko 2. Muutamia esimerkkejä globaaleista optisiin satelliittikuviin perustuvista LAI-tuotteista.

Tuottaja	Nimi	Menetelmä	Sensori	Saatavuus	Maaresoluutio	Aikaresoluutio
Copernicus	CGLS	Hermoverkko	VEGETATION, PROBA-V	1999– kesäkuu 2020	1 km	10 päivää
Copernicus	CGLS 300m V1	Hermoverkko	OLCI, PROBA-V	2014→	1/3 km	10 päivää
NASA	MOD15A2H	Fysikaalinen malli	MODIS	2000→	0,5 km	8 päivää
NOAA	AVH15C1	Hermoverkko	AVHRR	1981→	~5 km	1 päivä
NOAA/ NASA	VNP15A2H	Fysikaalinen malli	VIIRS	2012→	0,5 km	8 päivää

Tämän vuoden isoimpana kaukokartoitus uutisena on (ainakin Euroopan tasolla), että Copernicus-ohjelman geoinformaatiopalvelut tulee tarjoamaan käyttäjilleen erittäin korkean maaresoluution satelliittikuva-aineistoa koko Euroopan kattavasti (ts. 39 maata) vuoden 2021 loppuun mennessä. Uusi aineisto koostetaan monien eri satelliittisensorien mittauksista, joten aineiston maaresoluutio tulee olemaan joko 2 m tai 4 m. Aineisto jako tullaan toteuttamaan esikäsiteltyinä $25 \text{ km} \times 25 \text{ km}$:n kokoisina datapaketteina, joiden kokonaisuus koko Euroopan kattamiseksi on 11 686. Lähivuosina voikin alkaa uusi aikakausi LAI:n kaukokartoituksen historiassa, kun uusiin erittäin korkean maaresoluution aineistoihin pohjaavat menetelmät alkavat valtaamaan alaa.

Lopuksi haluaisin vielä tarjota konkreettisen esimerkin siitä, mitä globaalien satelliittimitauksiin perustuvien LAI-tuotteiden kautta voidaan analysoida. Globaaleja LAI-tuotteita tarvitaan muun muassa ilmastosimulaatioihin, joiden tarkoituksena on tutkia kasvillisuuden vaikutuksia ilmastomuutokseen. Esimerkkinä CMIP6-projektin tarpeisiin kehitetty globaali LAI-tuote, joka kuvaa 35 vuoden (1981–2015) yli laskettuja LAI:n kuukausikeskiarvoja (Kuva 2). Ilmastosimulaatioiden parametrusointia varten laskettu LAI-tuote (GIMMS-LAI3g version 2) perustuu AVHRR-satelliittikuva-aikasarjaan. GIMMS-LAI3g LAI-tuotteen prosessointi sisälsi muun muassa seuraavat vaiheet: maaresoluution muutos tasolta $\sim 5 \text{ km} \times \sim 5 \text{ km}$ tasolle $\sim 30 \text{ km} \times \sim 30 \text{ km}$ ($0,25^\circ \times 0,25^\circ$),



Kuva 2. Esimerkki ilmastosimulaatioissa käytettävästä globaalista LAI-tuotteesta. Kuvassa LAI:n 35 vuoden kuukausikeskiarvot tammikuulle ja heinäkuulle. Kyseessä on globaalista aineistosta leikattu otos, joka kattaa Suomen. Tammikuun matalista LAI-arvoista on helppo huomata, kuinka lumi on yleensä tammikuussa peittänyt sekä ikivihreät puiden latvukset että aluskasvillisuuden.

puuttuvien ja mahdottomien arvojen poisto, LAI:n laskenta, ja LAI-arvojen keskiarvojen laskenta 14 päivän aikaikkunalla. Prosessoinnin lopussa laskettiin kuukausittaiset LAI:n keskiarvot 35 vuoden ajalle. Tuloksena saatava LAI-tuote kuvaa LAI:n kehitystä pitkän ajanjakson yli globaalisti.

Lähteitä

- Fang H, Baret F, Plummer S, Schaepman-Strub G (2019) An overview of global leaf area index (LAI): methods, products, validation, and applications. *Rev Geophys* 57: 739–799. <https://doi.org/10.1029/2018RG000608>.
- Majasalmi T, Rautiainen M, Stenberg P, Rita H (2012) Optimizing the sampling scheme for LAI-2000 measurements in a boreal forest. *Agr Forest Meteorol* 154–155: 38–43. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.10.002>.
- Majasalmi T, Rautiainen M, Stenberg P, Lukes P (2013) An assessment of ground reference methods for estimating LAI of boreal forests. *For Ecol Manage* 292: 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.12.017>.
- Majasalmi T, Stenberg P, Rautiainen M (2017) Comparison of ground and satellite-based methods for estimating stand-level fPAR in a boreal forest. *Agr Forest Meteorol* 232: 422–432. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.09.007>.
- Majasalmi T, Korhonen L, Korpela I, Vauhkonen J (2017) Application of 3D triangulations of airborne laser scanning data to estimate boreal forest leaf area index. *Int J Appl Earth Obs* 59: 53–62. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.02.022>.