

This is the post print version of the following article:

Vihervaara, Petteri, Kullberg, Peter & Hurskainen, Pekka. 2019. *Futura*: 3/2019: 16-27. **Biodiversiteetin mittaaminen ja uudet menetelmät.**

Biodiversiteetin mittaaminen ja uudet menetelmät

Petteri Vihervaara¹, Peter Kullberg¹ ja Pekka Hurskainen^{1,2},

¹Suomen ympäristökeskus, Biodiversiteettikeskus, Latokartanonkaari 11, 00790 Helsinki

²Helsingin yliopisto, Geotieteiden ja maantieteen osasto, PL 64, 00014 Helsingin yliopisto

Ingressi

Biodiversiteetti [luonnon monimuotoisuus, elonkirjo, luonnon informaatiopääoma] on kaikkia maapallon elollisia prosesseja ylläpitävä, korvaamaton voima, josta ihmiset ovat lukemattomin tavoin riippuvaisia. Lajit, ekosysteemit ja luonnon prosessit ovat aina kiehtoneet ihmismieltä. Uudet luonnontieteelliset läpimurrot sekä kiihtyvän väestönkasvun ja taloudellisen kehityksen aikaansaama kasvava tarve luonnosta saataville resursseille ja maankäytön muutoksille ovat lisänneet ymmärrystämme Maan resurssien rajallisuudesta. Tämän seurauksena 2000-luvulle tultaessa on huolestuttu yhä enenevässä määrin globaalimuutoksen aiheuttamista ilmasto- ja biodiversiteettikriiseistä. Biodiversiteetin tutkimukseen, siitä käytävään yhteiskunnalliseen keskusteluun ja sitä koskevaan politiikkaan liittyy olennaisesti huoli luonnon ja ihmisten tulevaisuudesta. Biodiversiteetin monien ulottuvuuksien vuoksi sen mittaaminen on haasteellista. Edistysaskeleet viime vuosina ovat olleet kuitenkin nopeita, mikä herättää toivoa, että biodiversiteetin suojeleminen ja kestävä käyttö voi olla mahdollista. Tässä artikkelissa käydään läpi biodiversiteetin seurannan uusia menetelmiä ja tulevaisuuden näkymiä, joissa mm. uusilla teknologioilla on yhä suurempi rooli.

Abstract (in English)

Our planet is undergoing massive global change. We are increasingly aware of the biodiversity crisis, which raises concerns about the future of nature and mankind. Targets and goals set at several multilateral environmental agreements to stop the crisis have been agreed, but effective follow-up and implementation requires relevant and timely biodiversity data. For this purpose, a set of policy relevant Essential Biodiversity Variables (EBVs), describing biological state and capturing major dimensions of biodiversity change, have been proposed. The generation of EBVs requires integration of in situ and Earth observation data. The first is collected in the field by experts, citizens, or automatic sensor networks, assisted by new technologies such as eDNA and machine learning, while the latter is measured from space or air, enabled by analysis-ready multi-sensor data and cloud computing services. As a case example for better biodiversity monitoring, Finnish Ecosystem Observatory (FEO) is proposed. FEO will combine and standardize environmental information from different data sources, making the data, metadata and models openly available and easily accessible for users and policy makers.

Avainsanat: kaukokartoitus, satelliitti, koneoppiminen, tekoäly, pilvipalvelut, biodiversiteettikato, kestävä kehitys, luonnon monimuotoisuus

Biodiversiteetin monet ulottuvuudet

Biodiversiteetti on elämää ja luonnon prosesseja ylläpitävä voima, jonka tuottamien ekosysteemi-palveluiden varaan monet ihmisten tarpeet ruoantuotannosta henkiseen hyvinvointiin nojautuvat (IPBES 2019). Biodiversiteetti on samaan aikaan uudistuva ja uudistumaton luonnonvara (Vihervaara et al. 2019). Hyvinvoivat populaatiot uudistuvat, muuntuvat ja sopeutuvat alati muuttuviin olosuhteisiin jatkuvasti; toisaalta liian suuri paine biodiversiteettiä kohtaan johtaa populaatioiden ahdinkoon ja pahimmillaan biodiversiteettikatoon, jolloin hävinnyttä luontopääomaa ei enää saada takaisin. Tämän tasapainottelun vaikutukset on alettu ymmärtää yhä paremmin, ja riskejä, joita biodiversiteettikadosta voi seurata, ei haluta ottaa. Tästä syystä YK:n yleiskokous on julistanut tulevat vuodet 2021-2030 ennallistamisen vuosikymmeneksi, joka koskee niin ilmastoa kuin ekosysteemejä. Samaan aikaan maailmalta uutisoidaan edelleen mm. Amazonin sademetsien hakkuista ja tulipaloista – tekemistä riittää. Jotta biodiversiteetin, ekosysteemien ja ekosysteemipalveluiden muutosta ja ennallistamisen vaikutuksia voidaan mitata, seurata ja ymmärtää, tarvitaan yhä tarkempia, nopeammin saatavilla olevia ja toistettavia mittareita.

Biodiversiteetillä on monta ulottuvuutta, jotka ekosysteemien seurannoissa tulee huomioida. Biodiversiteetin erilaisia osa-alueita kuvaavat mittarit on ehdoteltu luokiteltavan siten, että ne kattavat geneettisen monimuotoisuuden, lajit ja populaatiot, lajien ominaispiirteet (traits) mukaan lukien toiminnalliset piirteet (functional traits), eliöyhteisöjen rakenteen, ekosysteemien rakenteen (2D, 3D) sekä ekosysteemien toiminnan ja prosessit (4D) (Pereira et al. 2013; Navarro et al. 2017). Näiden biodiversiteetin osa-alueiden mittareiden yhtenäistämiseksi on viime vuosina tehty työtä GEO BON (The Group on Earth Observations Biodiversity Observation Network) –verkostossa, jossa on kehitetty ns. Essential Biodiversity Variables (EBV) –mittaristoa biodiversiteettiseurantojen harmonisoimiseksi. Järjestön tavoitteena on luoda yhtenäiset standardit biodiversiteetin tilan seuraamiseen, mikä tukisi mm. Kansainvälisen biodiversiteettisopimuksen (Convention on Biological Diversity, CBD) seuranta ja raportointia, sekä Hallitustenvälisen biodiversiteetti- ja ekosysteemipaneelin (Intergovernmental Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, IPBES, suomessa Luontopaneeli) tekemiä arviointeja ekosysteemien tilasta.

CBD:n määritelmän mukaisesti biodiversiteetin kolme osa-aluetta ovat geneettinen, lajistollinen ja elinympäristöjen monimuotoisuus. Ekologien perinteisesti käyttämät, teoreettiset diversiteetti-indeksit eivät ole kovinkaan hyviä absoluuttisen muutoksen mittareina ja niitä on vaikea soveltaa luonnon tilan arkiseen seurantaan. Oman haasteensa lajiston seurantaan ovat tuoneet taksonomisista luokitteluja nopeaan tahtiin muuttaneet geneettiset menetelmät, joiden kehitys on ollut huimaa. Periaatteessa geneettisen sekvenssoinnin tarjoama tieto on kaikkein tarkinta tietoa biologisen monimuotoisuuden esiintymisestä alueellisesti ja ajallisesti rajatussa näytteessä. Geneettisten menetelmien nopea kehitys voi jo lähitulevaisuudessa olla biodiversiteettiseurannoissa arkipäivää. Tässä artikkelissa tarkastelun pohjaksi on otettu nimenomaan EBV-luokitus, koska se tarjoaa teoreettisesti kattavimman tavan määrittellä biodiversiteetin kannalta keskeisiä ulottuvuuksia, ja pyrkii hyödyntämään uusia havainnointikeinoja biodiversiteetin tilassa tapahtuvien muutosten seurannassa. EBV-indikaattorien kehityksen haasteena on edelleen paikallisten erikoispiirteiden sulauttaminen mittareihin, sillä lajisto vaihtelee alueellisesti ja ekosysteemien mukaan (Vihervaara et al. 2017).

EBV-indikaattoreiden kehittämisessä korostuu sekä suorien havaintojen (in situ) että kaukokartoitus-instrumenteilla kerättävien havaintojen tarjoamien mahdollisuuksien hyödyntäminen ja yhteiskäyttö. Näillä menetelmillä kerätään alueellisesti ja ajallisesti yhä kattavampaa raakadataa, joka voidaan jalostaa tarkemmiksi biodiversiteetti-indikaattoreiksi, ja yhdistää malleihin. Mallien avulla biodiversiteetin tilaa koskevat estimaatit voidaan ensin ekstrapoloida alueellisesti kattaviksi tietopoinnoiksi, ja yhdistää edelleen monimutkaisempiin prosesseja kuvaaviin malleihin, jotka mahdollistavat myös ennusteiden tekemisen luonnon monimuotoisuuden tilan kehityksestä. Esimerkiksi IPBES-raporttien yhtenä tavoitteena on ollut skenaarioiden kehittäminen, joiden avulla voitaisiin ennakoida sosio-ekologisten muutosten vaikutusta tulevaisuuden biodiversiteetin ja ekosysteemipalveluiden tilaan. Perinteisemmät ennustemallit ovat yleensä tarkastelleet ilmastomuutosskenaarioiden tai maankäytön muutosten vaikutuksia lajien levinneisyyden ja runsauden muutoksiin, ja tällöin tarkastelun kohteeksi on yleensä rajoittunut jokin

taksonominen ryhmä, josta on olemassa hyvät lähtötiedot, esimerkiksi perhoset tai linnut. Biodiversiteetin kaikkia osa-alueita malleissa ei yleensä ole ollut mukana.

Kansainvälisessä biodiversiteettipolitiikassa yhä suurempi painoarvo on haluttu antaa biodiversiteetin valtavirtaistamiselle kaikessa yhteiskuntia koskevassa päätöksenteossa. Valtavirtaistamisen vaikutusten ja onnistumisen arvioiminen painottuu usein epäsuorien biodiversiteetti-indikaattoreiden seuraamiseen. Tällaisia ovat esimerkiksi ajureita, paineita, vaikutuksia ja vasteita (Drivers-Pressures-State-Impact-Response, DPSIR-mallin mukaan) koskevat mittarit. Tila-indikaattorit (S), jollaisiksi mm. EBV:t luetaan, kuvaavat puolestaan suoraan itse biodiversiteettiä. Esimerkkeinä tällaisista indikaattoriketjuista ovat vaikkapa maatalousympäristön pesimälinnuston kehitys, perinnebiotooppien ja luontoarvoiltaan rikkaan maatalousmaan laajuus (S), joihin vaikuttavat ruoantuotannon alueellinen kysyntä (D), maatalousalueen pinta-ala, lannoitteiden ja torjunta-aineiden käyttö (P), maatalousympäristöjen uhanalaisten luontotyyppien kehityssuunta (I), ja luomutuotantoala (R). Suomen luonnon tilaa kuvaavat indikaattorit, josta edellä mainitut esimerkitkin on poimittu, on esitely Luonnontila.fi-sivustolla. Se kokoaa yhteen tiedon biodiversiteetin tilasta pääelinympäristöittäin. Tämän lisäksi Suomessa on kymmenen vuoden välein laadittu lajien ja elinympäristöjen uhanalaisuuden arvioinnit, ns. punaiset kirjat, jotka kokoavat yhteen laajan asiantuntijajoukon ja parhaan saatavilla olevan tiedon (Hyvärinen et al. 2018; Kontula & Raunio 2018). Niiden lisäksi luonnon tilasta laaditaan raportteja mm. EU:n luonto- ja lintudirektiivejä varten joka kuudes vuosi.

Edellä mainittujen raportointien haasteena niin Suomessa kuin monissa muissakin maissa on ollut ympäristöseurantojen alasajosta ja julkisen sektorin budjettileikkauksista johtuva resurssivaje. Vaikka tietoa kertyy jatkuvasti mm. kansalaishavaintojen muodossa – hyvänä esimerkkinä lintuhavaintoja tuottava laaja vapaaehtoinen harrastajajoukko – ei tiedon koostamiseen ja seurantojen koordinointiin tahdo löytyä riittävää rahoitusta valtion budjetista. Toinen haaste liittyy tiedon avoimuuteen ja jatkokäyttöön: raportointeja varten tietoa kerätään ja koostetaan laajan asiantuntijajoukon voimin, mutta valitettavan vähän tuosta tiedosta on helposti saatavilla muihin biodiversiteettitutkimuksen tarpeisiin. Kuinka biodiversiteetin tilasta sitten saataisiin riittävän hyvää, kattavaa, monipuolista ja ajantasaista tietoa? Viime aikojen uudet teknologiset kehitysaskleet ovat avanneet mahdollisuuksia tiedontuotannon alueellisen kattavuuden, ajantasaisuuden ja automatisoinnin parantamiseen.

Kaukokartoitusaineistot ja pilvipalvelut mahdollistavat laajojen alueiden seurannan

Kaukokartoitus, kuten ilma-aluksista tehdyt ilmakuvaukset ja satelliittien toistuvat kuvaukset, on ollut arkipäivää jo usean vuosikymmenen ajan. Esimerkiksi Suomessa niitä on hyödynnetty monilähteisessä metsien inventoinnissa jo vuosia, maastomittausten tukena (Tomppo et al. 2012). Kaukokartoitusaineiston hyödyntäminen biodiversiteetin mittaamisessa on kuitenkin ollut viime vuosiin saakka melko vähäistä. Tähän ovat vaikuttaneet mm. kaukokartoitustuotteiden ja -ohjelmistojen maksullisuus, saatavuuden alueellinen vaihtuvuus, syvää menetelmäosaamista edellyttäneet kuvien esikäsittelyvaiheet sekä ylipäättään menetelmäkehitykseen liittyvät alkukankeudet. Vasta 2010-luvulle tultaessa kaukokartoituksen käytettävyys on huomattavasti parantunut yhtäältä avautuneiden ilmaisten aineistojen myötä (esim. Yhdysvaltain geologian tutkimuskeskuksen Landsat- ja Euroopan avaruusjärjestön Sentinel – satelliittiaineistot, Woodcock et al. 2008, Drusch et al. 2012), ja toisaalta avoimen lähdekoodin ohjelmistojen sekä tietokoneiden (ja erityisesti pilvipalveluiden) laskentatehon nopeasta kehityksestä johtuen (Wulder et al. 2012, 2018).

Satelliittien keräämien kaukokartoitusaineistojen korkea (10-30 m) tai erittäin korkea (jopa <1 m) spatiaalinen erotuskyky on arkipäivää, minkä jokainen Internetin karttapalveluja käyttänyt voi havaita. Tämän lisäksi kaukokartoitusinstrumenttien kyky erottaa pienet muutokset säteilyn aallonpituudessa (spektrinen erotuskyky) sekä kyky erottaa pienet muutokset mitatun säteilyn määrässä (radiometrinen erotuskyky) on parantunut merkittävästi, mahdollistaen muun muassa kasvillisuuden ja fenologian (so. fysiologiassa tapahtuvien vuodenaikaisvaihteluiden) muutosten aiempaa tarkemman ja luotettavamman havainnoinnin. Satelliittien määrän lisääntyessä myös satelliittikuvien ajallinen erotuskyky on parantunut: saman alueen yli lentävät eri satelliitit kuvaavat aluetta parhaimmillaan jopa päivittäin, mikä mahdollistaa

ympäristön muutosten entistä tarkemman havainnoinnin, sekä lisää todennäköisyyttä saada alueesta pilvettömiä kuvia.

Satelliittikuva-aineistojen teknisen kehityksen ja avoimen saatavuuden lisäksi on havaittavissa kaksi merkittävää edistystä liittyen aineistojen jakelupolitiikkaan, joilla on kauaskantoiset vaikutukset. Ensimmäinen näistä on satelliittikuva-aineiston tuottajien siirtyminen ns. analyysivalmiiden aineistojen (*Analysis Ready Data*, ARD) jakeluun. Tässä mallissa aineiston tuottaja on valmiiksi esikäsitellyt kuva-aineiston, jolloin käyttäjä voi ohittaa esikäsitelyvaiheen, valita eri tuotevaihtoehdoista tarvitsemansa haluamallaan alue- ja aikarajauksella, ja siirtyä suoraan analyysivaiheeseen. ARD-aineistot ovat muodostumassa alan standardiksi, mahdollistaen aineistojen yhä laajemman käytettävyyden eri sovelluksissa. Kun kaikki kaukokartoitusaineistot esikäsitellään standardoiduilla, vertaisarvioituilla, dokumentoituilla ja avoimilla menetelmillä, lisäetuna saavutetaan eri aineistojen vertailukelpoisuus niin ajallisesti kuin toisiinsa verrattuna, sekä tulosten parempi luotettavuus verrattuna aikaisempaan tilanteeseen, jolloin jokainen esikäsiteli kuvansa itse vaihtelevalla osaamisella ja vaihtelevin tuloksin (Dwyer et al. 2018, Claverie et al. 2018).

Toinen merkittävä satelliittikuvien jakelumallissa tapahtunut muutos on siirtymä malliin, jossa käyttäjä ei enää lataa aineistoja omalle koneelleen vaan kaikki käsittely- ja analyysivaiheet tapahtuvat kaukokartoitusaineistojen prosessointiin erikoistuneissa pilvipalvelussa, jota käyttäjä ohjaa verkkoselaimesta käsin. ARD-aineistot, sekä muut avoimesti saatavilla olevat globaalit paikkatietoaineistot ja algoritmit ovat suoraan käyttäjän helposti löydettävissä, hyödynnettävissä ja ohjelmoitavissa. Satelliittikuva-aineistojen jatkuvasti kasvava määrä ja suhteellisen vaikea käsiteltävyys lienee osasyynä tähän kehitykseen - esimerkiksi uutta Sentinel-2 -aineistoa kerätään 4 teratavua ja Landsat -aineistoa 1.5 teratavua päivittäin (ESA 2018, Roy et al. 2014). Pilvipalveluihin on olemassa kaupallisia vaihtoehtoja (esim. *Google Earth Engine*, *Amazon Web Services*), kaupalliselta pohjalta toimivia mutta julkista rahoitusta saavia alustoja (Euroopan avaruusjärjestön hallinnoimat DIAS-palvelut), sekä julkisen ja yksityisen sektorin yhteistoiminnallisia alustoja (*Earth Observation Data Centre*). Tämän lisäksi Euroopan avaruusjärjestö tarjoaa tutkijoiden käyttöön täyden palvelun ns. TEP-pilvipalveluita (*Thematic Exploitation Platforms*) esimerkiksi metsäsektorin sovelluksiin ja rannikkoalueiden tutkimukseen (<https://tep.eo.esa.int/about-tep>). Pilvipalveluiden osalta eletäänkin tällä hetkellä jonkinlaista kukoistuskautta: erilaisia palveluntarjoajia on lukuisia jolloin niiden tarjoamien palveluiden, aineistojen ja hinnoittelun vaihdellessa tavallisen käyttäjän voi olla vaikea vertailla ja löytää omiin tarpeisiinsa sopivaa ratkaisua. Käyttäjässä huolta herättää myös tietoturva-asiat sekä palveluiden elinkaareen liittyvät kysymykset. Lähitulevaisuudessa saattaakin olla mahdollista, että pilvipalveluiden tarjoajien määrä kääntyy laskuun ja vain menestyneimmät, käyttäjiensä tarpeisiin parhaiten mukautuvat ja reagoivat palvelut jäävät jäljelle.

Monikanavaisten satelliittikuva-aineistojen lisäksi laserkeilaus (LiDAR) ja hyperspektrikuvaus eli kuvantava spektroskopia ovat vaihtoehtoisia keinoja tuottaa ympäristön tilaa ja rakennetta kuvaavaa mittaustietoa laajoilta alueilta. Laserkeilauksen avulla saadaan tietoa kohteen kolmiulotteisesta rakenteesta, esimerkiksi puuston korkeudesta (joka korreloi iän suhteen) ja metsien kerroksellisuudesta. Näillä muuttujilla on merkitystä mm. monien metsälajien esiintymiselle, kuten vaikkapa linnuille. Vihervaara et al. (2015) ja Mononen et al. (2017) yhdistivät LiDAR -aineistosta laskettuja metsien rakennemuuttujia kansalaishavaintoina kerättyihin metsälintujen pesimäaikaisiin havaintoihin, mikä osoitti näiden aineistojen käyttökelpoisuuden lajien elinympäristöjen mallintamisessa.

Hyperspektrikuvaus puolestaan kerätään tietoa monikanava-satelliittikuvia laajemmalla spektrialueella ja huomattavasti kapeammilla aallonpituusalueilla, jolloin saadaan täsmällisempää tietoa heijastavan kohteen ominaisuuksista. Biodiversiteetin mittauksen kannalta tämä tarkoittaa esimerkiksi sitä, että voidaan arvioida puun latvuston lehtien kemiallisia ominaisuuksia, kuten typpi- tai puolustusainepitoisuuksia, jotka taas voivat toimia indikaattorina metsien kunnosta tai taudeista. Nämä muuttujat tarjoavat tietoa myös kasvillisuuden toiminnallisista ominaispiirteistä, esimerkiksi haihdunnasta, hiilensidonnasta tai karikkeentuotannosta, mahdollistaen tiedon yhdistämisen ekosysteemiprosesseja kuvaaviin malleihin. Hyperspektriaineiston avulla on myös mahdollista tunnistaa puita lajilleen tarkemmin

kuin millään muulla kaukokartoitusaineistoilla, ja menetelmää on testattu jo monissa erilaisissa biotoopeissa (Dalponte et al. 2012; Asner et al. 2014; Nevalainen et al. 2017). Parhaimmillaan hyperspektriaineiston käyttö voi mahdollistaa jopa lajinsisäisen geneettisen monimuotoisuuden vaihtelun havainnoinnin (epäsuorasti) maisematasolla, kuten on osoitettu mm. amerikanhaavalla (*Populus tremuloides*) Appalakeilla (Madritch et al. 2014).

Lentokoneista tehtävä, koko maan kattava laserkeilauskampanja (0,5 pulssia/m²) on toteutettu Suomessa v. 2008 - 2019, ja monista muistakin Euroopan maista vastaavaa aineistoa on kerätty. Näissä kampanjoissa pääasiallinen tarkoitus on kuitenkin ollut tiedonkeruu maanpinnan korkeuden ja metsävaratietojen mallintamista varten. Keskustelua seuraavista valtakunnallisista mittauskampanjoista eri toimijoiden ja sidosryhmien välillä on käyty, ja aineiston käytettävyyttä biodiversiteetin kannalta tärkeiden ekosysteemien rakennepiirteiden määrittelyssä parantaisi pulssitiheyden nostaminen 8 pulssiin neliometrillä. Lentokoneella tehtävän aineistonkeruun ongelmana on kuitenkin hitaus, sillä koko Suomen kattanut kampanja on vienyt yksitoista vuotta. Eri alueiden väliset aikaerot ovat jo niin huomattavia, että kasvillisuuden muutokset jäävät huomioimatta. Joidenkin muutosmittareiden määrittelyssä tämä on riittävä aikaväli, mutta parempi olisi, jos saatavilla olisi tietoa vähintään vuosittain.

Toistaiseksi LiDAR- ja hyperspektridataa on ollut saatavilla lähinnä lentokoneista, helikoptereista sekä miehittämättömistä ilma-aluksista (drone) kerättynä, poikkeuksena vuosina 2000 – 2017 toiminnassa ollut Pohjois-Amerikan avaruusjärjestön (NASA) kokeellinen Hyperion -instrumentti EO-1 satelliitissa, jota hyödynnettiin esim. metsien rakenteellisen monimuotoisuuden tutkimisessa (White et al. 2010).

Vuoden 2019 maaliskuussa tiedonkeruun aloittanut, kansainväliselle avaruusasemalle asennettu GEDI-laserkeilain on nostattanut suuria odotuksia erityisesti metsäkasvillisuuden vertikaalisen rakenteen, latvuskorkeuden ja maanpäällisen biomassan globaaliin mittaukseen ja seurantaan (esim. Qi 2019). Sen rajoitteena biodiversiteetin tilan seurannan kannalta on kuitenkin kahden vuoden suunniteltu toiminta-aika ja mittauksen alueellinen rajoittuminen avaruusaseman kiertoradan mukaisesti 51.6°E ja 51.6°P leveyspiirien väliin (Hancock et al. 2019).

Lukuisia uusia kuvaavia spektrometreja on suunnitteilla laukaistavaksi avaruuteen, esim. Saksan avaruusjärjestön EnMAP (Guanter et al. 2016) sekä Euroopan avaruusjärjestön CHIME. Toteutuessaan näiden hyperspektri-instrumenttien keräämä globaali aikasarja-aineisto olisi käänteentekevä biodiversiteetin mittaamisen ja seurannan kannalta, etenkin yhdistettynä muihin kaukokartoituksella kerättyihin aikasarja-aineistoihin ja *in situ* -havaintoihin.

Suuren laskennallisen läpimitan tutka eli SAR (*Synthetic Aperture Radar*) on jo 1950-luvulla kehitetty tiedonkeruumenetelmä. LiDARin tapaan tutkakuvaus on aktiivinen kaukokartoitusmenetelmä, eli se ei ole riippuvainen auringon heijastamasta tai emittoimasta energiasta, ja voi näin ollen operoida vuorokauden ympäri. Tutkakuvauksen lisäetuna muihin menetelmiin verrattuna on mahdollisuus kuvata lähes kaikissa sääolosuhteissa, tutka-aaltojen läpäistessä ilmakehän pilvikerrokset ja näin mahdollistaen tiedonkeruun erittäin pilvisillä alueilla, kuten sademetsissä ja vuoristoissa. SAR-instrumentit toimivat eri aallonpituuksilla: lyhyen aallonpituuden (~2-6 cm) tutkasignaalit läpäisevät vain osittain kasvillisuuden eri kerroksia, soveltuen siten paremmin matalamman kasvillisuuden tutkimiseen (Nagendra et al. 2013), kun taas pidemmän aallonpituuden (~23-60 cm) signaalit läpäisevät ne kokonaan, mikä soveltuu paremmin ekosysteemien rakenteen, maanpäällisen biomassan ja kasvillisuuden korkeuden mittaamiseen (esim. Karjalainen et al. 2009). Vaikka tutka-aineiston potentiaali on merkittävä, toistaiseksi SAR -sovellukset biodiversiteetin mittaamiseen ovat olleet vähäisiä (Nagendra et al. 2013), mikä on saattanut johtua aineiston saatavuusongelmista, lukuisista esikäsittelyvaiheista, ja analysoinnin koetusta hankaluudesta. Lähitulevaisuudessa tämä saattaa kuitenkin muuttua, sillä SAR -aikasarjoja on avoimesti saatavilla (mm. Euroopan avaruusjärjestön Sentinel-1 ja Japanin avaruusjärjestön PALSAR), ja piakkoin työläät esikäsittelyvaiheetkin voinee tavallinen käyttäjä ohittaa, kun ne saadaan käsiteltyä ARD-tuotteiksi tutkijoiden käyttöön esim. DIAS -pilvipalveluissa.

Pienemmällä mittakaavalla kaikkein tarkinta dataa on saatavissa droneilla, joihin voidaan kiinnittää monenlaisia kameroita ja sensoreita. Ketterät dronet ovat parhaimmillaan intensiivimittauksissa, joissa selvitetään pienen alueen tai jonkin erityisen biodiversiteetin ominaispiirteen esiintymistä. Haittapuolena on aineistonkeruun pienialaisuus ja hitaus. Kiinteäsiipiset lennokit pystyvät kuitenkin jo kattamaan useiden neliökilometrien suuruisia alueita, mikä laajentaa käytettävyyttä perinteisiä koptereita laajemmalle alueelle. Dronella tehtävän aineistonkeruun määrittelyä esimerkiksi tukemaan uhanalaisten luontotyyppien arviointeja ei toistaiseksi ole Suomessa tehty. Muutenkin yritykset kehittää luontotyyppien luokittelua kaukokartoitustiedon pohjalta ovat olleet vähäisiä (Tuominen et al. 1997; VELMU; Vihervaara et al. 2017).

Maastohavainnot luovat pohjan biodiversiteetin seurannalle

Kaukokartoitusaineistojen lisäksi luonnontilan seuraaminen edellyttää havaintojen tekemistä paikan päällä maastossa. Kaukokartoitusaineistoihin verrattuna maastohavainnoilla voidaan saada yksityiskohtainen kuva tietyn alueen elonkirjosta: pyydykseen jääneet perhoset voidaan tunnistaa mikroskoopin alla lajilleen, elinympäristötyyppejä indikoivat lajit voidaan etsiä lehtien lomasta tai yksilöistä voidaan ottaa näytteitä geneettistä analyysiä varten. Tarkkuus tulee kuitenkin kattavuuden kustannuksella: käytettävissä olevien resurssien vuoksi maastohavainnoita on yleensä mahdollista kerätä vain rajatulta alueelta ja suhteellisen harvalla aikavälillä. Käytännössä rajat havaintojen tarkkuudelle asettaa käytettävissä oleva aika, varat, menetelmät ja asiantuntemus. Maastohavaintojen tuoma yksityiskohtainen tieto on kuitenkin välttämätöntä luonnon tilan ja prosessien syvällisen ymmärtämisen kannalta ja tärkeää lähtöaineistoa monille kaukokartoitusaineistoihin perustuville malleille.

Perinteisesti monimuotoisuuden havainnointi on tapahtunut saappaat jalassa. Maastossa kartoittaja on kirjannut ylös havaintonsa paikallisesta lajistosta, elinympäristöistä tai muista tärkeistä ympäristömuuttujista, kuten lämpötilasta tai maaperän koostumuksesta. Maastotietojen keruumenetelmät ovat kuitenkin kehittyneet nopeasti ja toisinaan havainnoitsijoita on korvattu maastoon asetettavilla sensoreilla, jotka voivat kerätä ja lähettää aineistoa väsymättä ja objektiivisesti (Sethi et al. 2018, Ribeiro et al. 2017). Tulevaisuudessa myös lennokkien käyttäminen esimerkiksi vesinäytteiden ottamisessa tulee todennäköisesti yleistymään (Lally et al. 2019). Resurssien säästämisen lisäksi sensoreilla tehtävän seurannan hyötyjä ovat havainnointimenetelmien yhtenäistyminen, havaintojen aikavälin lyheneminen ja ympäristölle aiheutuvien häiriöiden väheneminen.

Erilaisia ympäristömuuttujia, kuten lämpötilaa mittaavia automaattisia sensoreita on luonnossa ollut jo pitkään. Viime aikoina myös monimuotoisuuden suora mittaaminen automaattisilla sensoreilla on tullut mahdolliseksi. Esimerkiksi maastoon asetettavien kamera-ansojen ja ääninauhurien avulla voidaan havainnoida lajistoa (Sethi et al. 2018, Ribeiro et al. 2017). Koneoppimisen mahdollistama lajien automaattinen tunnistaminen voi tehdä suurienkin aineistojen purkamisesta nopeaa (Stowell et al 2018, Sethi et al. 2018). Tämän seurauksena maastoon voidaan jättää tallentimia havainnoimaan lajistoa pitkiksikin ajoiksi. Erityisen hyviä kokemuksia lajien automaattisesta tunnistamisesta on saatu äänten osalta – lintujen, lepakoiden tai jopa hyönteisten tunnistaminen ääninäytteistä on jo monelta osin arkipäivää (Russo et al. 2016, Ribeiro et al. 2017, Santos et al. 2019). Myös eläinten tunnistamista yksilötasolle äänten perusteella on tutkittu useilla lajeilla (Stowell et al 2019). Tällaisen aineiston avulla olisi mahdollista seurata esimerkiksi lajin liikkumista eri alueiden välillä ilman, että yksilöitä täytyisi ottaa kiinni ja merkitä.

Luonnon prosesseja, kuten vuodenaikojen vaihteluun liittyviä ilmiöitä, voidaan myös havainnoida kameroilla. Tästä hyvänä esimerkkinä ovat EUMETSAT-hankkeen yhteydessä eripuolille Suomea sijoitetut 28 fenologiakameraa, joiden avulla havainnoidaan muun muassa lumen tuloa ja lehtien puhkeamista (Peltoniemi et al. 2017). Muutokset fenologiassa on yksi EBV-konseptin ympäristömuuttujista, ja sen avulla voidaan selvittää muun muassa ilmaston muutokseen vaikutuksia monimuotoisuudelle. Toisaalta kameroilla ja ääninauhureilla voidaan havainnoida myös monia muita asioita, esimerkiksi ihmisen toiminnan aiheuttaman häiriön määrää (Nyeema et al 2019).

Geenitekniikan kehittyminen on myös avannut uusia mahdollisuuksia monimuotoisuuden kartoittamiseksi. Niin kutsutulla eDNA (environmental DNA) tekniikalla esimerkiksi maaperä- tai vesinäytteestä voidaan tunnistaa lajeja tai lajiryhmiä epäsuorasti ilman kosketusta varsinaisiin yksilöihin (Thomsen & Eske 2015). Sekvensointimenetelmien kehittyminen on tehnyt geneettisistä menetelmistä edullisia ja nopeita, ja esimerkiksi Britanniassa vesiliskojen asuttamien lampien tunnistaminen eDNA:n avulla on jo osa kartoittajan työkalupakkia (Natural England 2015). Menetelmä on erityisesti hyödyksi tilanteissa, joissa lajien tunnistaminen olisi muuten vaikeaa (esim. maaperän pieneliöt) tai niiden löytäminen työlästä (vesiliskot lammessa). Menetelmät voivat olla hyvinkin tarkkoja, ja esimerkiksi lammessa oleilevan vesiliskon pystyy yleensä havaitsemaan yhdestä vesinäytteestä, jonka, toisin kuin suoran havainnoinnin, voi kerätä mihin aikaan tahansa (Biggs et al 2015).

Kansalaistiede on myös yhä tärkeämpi luontohavaintojen lähde ammattilaisten tuottaman tiedon ohella. Mobiililaitteiden, kameroiden ja internetpalveluiden kehittyminen on tehnyt havaintojen keräämisestä helppoa ja vaivatonta. Esimerkiksi iNaturalist ja eBird-sovelluksilla käyttäjä voi kirjata ylös havaintoja ja kuviaan helposti missä tahansa liikkeeseen (www.inaturalist.org, ebird.org). Suurempi virheiden mahdollisuus asiantuntijoiden keräämään aineistoon verrattuna on syytä huomioida, kun kansalaishavaintojen pohjalta tehdään tulkintoja. Järjestelmien ympärille kehittynyt yhteisö voi kuitenkin auttaa lajiston tunnistamisessa, ja riittävän laadukkaaksi todetut havainnot siirtyvät automaattisesti osaksi GBIF:n (Global Biodiversity Information Facility) havaintotietokantaa. Suomessa Laji.fi:n Vihko-palvelu toimii vastaavana kansalaisten havaintopäiväkirjana, BirdLifen Tiira-palveluun (tiira.fi) taas tallennetaan päivittäin lukuisia lintuhavaintoja. Kansalaistieteen vaikuttavuuden lisäämiseksi on koettu tärkeäksi, että kansalaiset myös osallistuvat hankkeisiin aktiivisina tiedon käyttäjinä ja oman ympäristönsä tarkkailijoina (Liu et al 2014). Tällaisia kerääjän aktiivisuutta ja vastuunottoa korostavia kansalaistiedehankkeita on alettu kutsua kansalaisobservatorioksi. Myös niissä teknisillä alustoilla on keskeinen rooli niin tiedon tallennuskanavana kuin havainnoijayhteisöä palvelevana tietolähteenä.

Maastohavaintojen ei tarvitse aina olla kerätty varta vasten luonnon seurantaan varten. Esimerkiksi sosiaalisen median tietovarantoja, jotka ovat pullollaan esimerkiksi kansalaisten ottamia luontokuvia, voidaan myös hyödyntää luontotiedon lähteinä. Esimerkiksi koneoppimisen avulla kuvista voidaan tunnistaa eläinlajeja, ja kun tämä tieto yhdistetään kuvan aika- ja paikkaleimaan voidaan tietoja hyödyntää esimerkiksi lajien levinneisyyden ja niiden ihmisten toiminnan seurauksena kokeman paineen arvioimisessa (Toivonen et al. 2019).

Avaamalla ja yhtenäistämällä parempiin tuloksiin

Luonnon tilan tarkkailun näkökulmasta maastohavaintoaineistojen ongelmana on monien havainnointiprojektien lyhytkestoisuus ja suppea fokus. Mittaukset on tehty usein vain tiettyä käyttötarkoitusta varten (tutkimushankkeet, kansalaistiedeprojektit) ja tulokset on tallennettu museoihin, tutkimushankkeiden kovalevyille, viranomaisten tietokantoihin tai harrastajien vihkoihin. Kansalaisten keräämä aineisto on toisaalta usein epäsystemaattisesti kerätty ja keskittynyt tyypillisesti alueille, joilla ihmiset liikkuvat paljon (Amano et al. 2016). Tällaisen hajanaisen aineiston uusiokäyttö luonnontilan pysyvään seurantaan on vaikeaa. Muutoksien havaitseminen luonnossa ja erilaisten monimuotoisuuden kehitystä mittaavien indikaattorien järkevä kehittäminen hyötyisi systemaattisesti ja pitkäjännitteisesti kerätystä aineistosta, joka kattaisi laajasti erilaisia ympäristömuuttujia.

Viime aikoina maastohavaintoaineistojen avoimuuden, yhtenäisyyden ja saatavuuden parantaminen onkin noussut tärkeäksi kehityssuunnaksi. Tämä kehitys pohjautuu toisaalta pyrkimykseen yhtenäistää aineistojen keruu- ja tallennusmenetelmiä, toisaalta uusiin digitaalisiin aineistoportaaleihin, jotka kokoavat yhteen ja tarjoavat helpon pääsyn suureen määrään eri yhteyksissä koottuja ainesitoja. Eri tarkoituksiin kerättyjä aineistoja yhdistelemällä voidaan saada kattavampi kuva tilanteesta, kuin mihin aineistoja varta vasten keräämällä voitaisiin päästä. Tavallisesti kartoitushankkeet lähtevätkin liikkeelle jo saatavilla olevan aineiston etsimisellä.

Jo muutaman vuoden toiminut Suomen Lajitietokeskus on hyvä esimerkki havaintoja yhteen kokoavasta ja yhtenäistävästä avoimesta portaalista (www.laji.fi). Sen Laji.fi -palvelun kautta kuka tahansa voi tutustua eri lähteistä koottuihin lajihavaintoihin, digitoituihin näytteisiin ja ekologiaan. Laji.fi:ssä on tämän artikkelin kirjoittamishetkellä tallennettuna yli 32 miljoonaa havaintoa yli 34 000:sta eri lajista, jotka ovat peräisin niin luonnontieteellisten museoiden digitoiduista kokoelmista kuin harrastajien havaintotietokannoista. Laji.fi:n Vihko-palvelun kautta ammattilaiset ja harrastajat voivat kirjata järjestelmään havaintojaan, joista tarkastuksen jälkeen voi tulla osa tietokanan sisältöä. Suomen lajitietokeskus on osa maailmanlaajuisia GBIF-hanketta, joka kerää yhteen lajihavaintoja kaikkialta maailmasta. GBIF-on ollut toiminnassa jo vuodesta 2001 ja sen tietokantoihin on tähän mennessä kertynyt yli 1,3 miljardia havaintoa, jotka ovat peräisin yli 45 000 eri tietoaaineistosta eri puolilta maapalloa (www.gbif.org).

Pelkkä aineistojen saatavuus ei takaa niiden käytettävyyttä uusissa yhteyksissä. Eri tahot kuvaavat aineistojaan yleensä hieman eri muuttujilla ja termeillä, mikä on vaikeuttanut eri lähteistä tulevan aineiston yhteiskäyttöä. Tämän ongelman ratkaisemiseksi on kehitetty erilaisia datastandardeja, jotka ovat ylätason kuvauksia siitä, miten havainnot tulee kirjata ja tallentaa. Havainto- ja kirjausmenetelmien yhtenäistäminen on ollut edellytys myös aineistoportaalien kehitykselle. Darwin Core, jota myös GBIF ja laji.fi hyödyntävät, on laajalle levinnyt esimerkki lajihavaintojen datastandardista (Wieczorek et al. 2012). Se määrittää mitä tietoja lajihavainnosta pitää kirjoittaa ja mitä termejä käyttää. Lajihavaintojen yhteisen käytön kannalta tärkeää on myös lajinimistön standardointi. Sama laji on voitu kuvata useassa eri paikassa ja niiden nimet ovat voineet muuttua ajan saatossa. Tämä aiheuttaa luonnollisesti päänvaivaa monimuotoisuuden tutkijoille. Kansainvälinen Catalogue of Life -hanke onkin pyrkinyt vähentämään lajien nimistöön liittyviä sekaannuksia kokoamalla nimistöä standardilistaa (www.catalogueoflife.org).

Vastauksena maastohavaintoaineistojen hajanaisuudelle on myös perustettu havaintoalueiden verkostoja, joiden tavoitteena on vartta vasten tuottaa jatkuvaa ja kattavaa tietoa luonnontilasta. Esimerkkejä tällaisista hankkeista ovat Australian TERN (Terrestrial Ecosystem Research Network, www.tern.org.au), Yhdysvaltojen NEON (National Ecological Observatory Network, www.neonscience.org) tai Euroopan LTER (Long Term Ecosystem Research, www.lter-europe.net) verkostot. Verkostot koostuvat koealoista, joista kattavimmilta kerätään jatkuvaa tietoa ympäristömuuttujista kuten säästä, ilmakehän koostumuksesta, hiilivuosta, maaperästä, maankäytöstä ja lajistosta aina yksilöiden ja genetiikan tasolle. Jotta mahdollisesti havaitut muutokset luonnon tilassa voitaisiin paremmin yhdistää niiden perimmäisiin syihin, tallennetaan joiltain alueilta myös sosioekonomisia muuttujia. Toiset havaintoverkostot keskittyvät vain tiettyyn teemaan. Esimerkiksi EU:n LUCAS-hanke kartoittaa maanpeitettä kuvien avulla ja maaperän laatua yli neljännesmiljoonalta havaintopisteeltä (Karydas et al 2015). Keskeistä hankkeille on systemaattiset menetelmät ja tallennusmuodot, jolloin kerätty aineisto voidaan jakaa avoimesti kaikkien asiasta kiinnostuneiden tutkijoiden, kansalaisten tai viranomaisten käyttöön.

Ratkaisuna Suomen ekosysteemiobservatorio

Suomessa luonnontilan kehitystä seurataan ahkerasti. Tähän meitä velvoittavat niin erilaiset kansainväliset sitoumukset, kansalliset lait kuin tarve perustaa päätöksenteko ymmärrykseen eri toimien luontovaikutuksista. Luonnontilan huomioiminen on myös enenevässä määrin tärkeä osa kansallisen (luonto-)pääoman suuruuden arviointia perinteisen bruttokansan tuotteen ja luonnonvaratilastoja lisäksi.

Luonnon tilan seuraaminen ja raportointi vaatii paljon asiantuntijatyötä, joka perustuu usein erilaisiin havaintoaineistoihin ja niiden pohjalta muodostettuihin ympäristön tilaa kuvaaviin suureisiin ja indikaattoreihin. Esimerkiksi arviot metsien ekologisesta tilasta voivat perustua tietoon vanhojen metsien laajuudesta, lahopuun määrästä talousmetsissä ja metsäpalojen yleisyydestä. Nämä suureet voivat vuorostaan olla johdettu esimerkiksi eri puolilla Suomea sijaitsevilta koealoilta saaduista metsävaratiedoista, satelliittikuva-aineistojen antamasta käsityksestä metsäpinta-alan muutoksesta sekä näihin lähtötietoihin perustuvista malleista. Seuranta-aineistojen kehitys, kuten kansalaishavaintojen lisääntyneet saatavuus tai uudet satelliittituotteet, mahdollistavat myös uudenlaisten indikaattorien kehittämisen.

Runsastuvan ja monipuolistuvan aineiston analysointi vaatii enenevässä määrin substanssiosaamisen lisäksi myös taitoja data-analytiikassa. Erilaisten arvioiden tekeminen lähteekin usein liikkeelle kulloisenkin kysymyksen kannalta olennaisen aineiston keräämisellä eri lähteistä, ja niiden muokkaamisella analyysejä varten sopivaan muotoon. Pelkkä raaka-aineisto ei kuitenkaan sellaisenaan kerro ympäristön tilasta, vaan sen pohjalta täytyy tehdä usein erilaisia analyysejä, jotta haluttu tieto saadaan esille.

Ympäristötietoon perustuvaa luonnontilan seurantaan tukemaan ollaan suunnittelemassa Suomen ekosysteemiobservatorioksi (Finnish Ecosystem Observatory, FEO) nimettyä järjestelmää. Latinan sana *observatorium*, josta hankkeen nimikin on johdettu, tarkoittaa havainnointipaikkaa. Suomen ekosysteemiobservatorion tarkoituksena onkin toimia monipuolisena havaintopaikkana, josta voisi luoda laajan katsauksen Suomen ekosysteemien tilaan. Sinne koottaisiin yhteen erilaiset ympäristön tilaa kuvaavat muuttujat ja indikaattorit sekä niiden tuottamiseen tarvittavat aineistot, prosessikuvaukset ja mallit.

Ekosysteemiobservatorio olisi siten ympäristön tarkkailun työkalupakki, josta voisi löytää helposti erilaiset ympäristön tilan arvioinnissa käytettävät indikaattorit ja tarvittaessa selvittää, miten ne on tehty. Ekosysteemiobservatorion ytimen muodostaisi tietokanta, jossa eri indikaattorit ja niihin käytetyt aineistot ja prosessoinnit olisi selkeästi kuvattu. Tavoitteena on, että järjestelmään kertyisi ajan myötä laaja kattaus erilaisia indikaattoreita kuvauksineen. Ne tulisi olla etsittävässä erilaisilla hakusanoilla ja mahdollisuuksien mukaan avoimesti tarkasteltavissa ja hyödynnettävissä.

Tällaisella monimuotoisuusmuuttujien avoimella tietokannalla olisi monia etuja. Ensinnäkin se toimisi prosessien ja aineistojen kirjastona luonnontilan raportoinnista vastuussa oleville henkilöille. Usein arvioita ympäristön tilasta on tarvetta tehdä toistuvasti. Esimerkiksi jäsenmaat suorittavat EU:n luontodirektiivin mukaisen raportoinnin elinympäristöjen tilan kehityksestä joka kuudes vuosi. Arvioiden tekijöiltä säästyisi aikaa, kun aineistoja ja prosesseja ei tarvitsisi joka kerta rakentaa alusta asti, vaan työhön voisi käyttää FEO:sta valmiiksi löytyvää työkalua – parhaimmassa tapauksessa analyysit voisi uusia lähes automaattisesti aina kun lähtöaineistoissa tapahtuu muutoksia.

Valituilla analyysimenetelmillä voi olla huomattavia vaikutuksia indikaattoreiden antamiin arvoihin ja siksi onkin tärkeää pystyä seuraamaan menetelmissä tapahtuvia muutoksia. Järjestelmän avulla voitaisiin paremmin eritellä, mikä osa indikaattorin arvon muutoksesta johtuu mahdollisista muutoksista menetelmässä, ja mikä varsinaisesta ympäristön tilan muutoksesta. Järjestelmän avulla voitaisiin myös tarpeen mukaan varmistua siitä, että menetelmät pysyvät eri raportointikerroilla samana. Toisaalta prosessointimenetelmien avoin saatavuus helpottaisi niiden jatkokehitystä ja käyttöä uusissa yhteyksissä. Kuten avoimien ohjelmistojenkin kohdalla usein osoitettu tapahtuvan, mittareiden avoin dokumentointi voisi johtaa suljettua systeemiä nopeampaan virheiden ja puutteiden havaitsemiseen ja korjaamiseen.

FEO lisäisi myös päätöksenteon ja ympäristön tilan seurannan avoimuutta. Kun ympäristöntilaa kuvaavien mittareiden toimintaperiaate on kaikkien tarkasteltavissa, voidaan niiden sopivuudesta tehtävään ja kehittämisestä käydä avointa keskustelua. Jos esimerkiksi eri toimijat ovat tietyn mittarin sopivuudesta eri mieltä, voidaan niistä tarvittaessa luoda kilpailevia versioita ja vertailla tuloksia. Mittareiden avoimuus lisää myös niiden ja niihin perustuvan päätöksenteon luotettavuutta.

Lopuksi menetelmien ja niihin liittyvien aineistojen tuominen yhteen paikkaan helpottaisi mittariston ja aineistojen mahdollisten aukkojen havaitsemista. Mikäli tietystä aihepiiristä on vähän tietoa, tai johonkin tärkeään kysymykseen ei voida vastata nykyisillä aineistoilla, voidaan erityistä huomiota kiinnittää uusien menetelmien kehittämiseen tai aineistojen keräämiseen tällä osa-alueella.

Uudet teknologiat päätöksenteon tukena

Uusien teknologioiden käyttöönotto millä tahansa alalla vaatii aikaa. Esimerkiksi kaukokartoituksen käytöstä biodiversiteetin seurannassa on puhuttu tutkijoiden kesken jo yli 20 vuotta, mutta vasta viime vuosina menetelmien tarkkuus ja käytettävyys ovat parantuneet sille tasolle, että niiden ottaminen arkipäiväiseen käyttöön on todella ajankohtaista. Ilmastonmuutoksen ja ekosysteemien heikentymisen aiheuttamien nopeiden ympäristömuutosten vuoksi uusien seurantamenetelmien käyttöönotto on suorastaan välttämätöntä. Tarkentunut ja ajantasainen tieto on järkevän päätöksenteon edellytys. Luonnon monimuotoisuuden seurannan ja suojelualueiden priorisoinnin lisäksi uusien seurantamenetelmien sovelluskohteita löytyy etenkin maa- ja metsätaloudesta sekä luonnon virkistyskäytön edistämisestä. Globaalistuvan talouden ja kiertotalouden myötä paikkatiedon kytkeminen eri tuotantoalojen biodiversiteettivaikutusten elinkaariarviointiin on nousemassa yhdeksi keskeiseksi sovelluskohteeksi, missä esimerkiksi kaukokartoituksen avulla saatavat ekosysteemien kuntoa kuvaavat mittarit voisivat auttaa kestävässä päätöksenteossa. Myös ekosysteemitilinpidon kehitys on vahvassa myötätuulussa sekä YK:n että EU:n agendalla, ja kaukokartoitus on keskeinen tapa tuottaa tietoa ekosysteemipalvelujen tilastoimiseksi.

Kansainvälisen luontopaneelin IPBESin tuottamat arviot biodiversiteetin ja ekosysteemipalveluiden tilasta keskittyvät nykytilaan (IPBES 2019), mutta toiveissa siintää, että mallien avulla voitaisiin laatia skenaarioita tulevaisuuden kehityssuunnista (IPBES 2016). IPBES-skenaarioiden tavoitteena olisi erityisesti pystyä tuottamaan ennusteita, miten biodiversiteetin ja ekosysteemien sekä sosio-ekonomisten systeemien vuorovaikutukset vaikuttavat niiden yhteisiin tulevaisuuksiin (Rosa et al. 2017). Vasta tällaisten kytkeytyneiden mallien avulla voitaisiin todella arvioida politiikkatavoitteiden, kuten esimerkiksi kestävä kehityksen tavoitteiden edellyttämiä luonnon tilan ja sosio-ekonomisten mittareiden tavoitetasoja (SDG 2015). Tavoite on hieno. Toteutuakseen se kuitenkin edellyttää nykyistä parempia kansallisia ja alueellisia tietojärjestelmiä ja seurantaa. Määrätietoinen institutionaalinen ympäristöseurantojen uudistaminen ja laajapohjainen kansainvälinen yhteistyö voi askel kerrallaan viedä siihen suuntaan, että kansallisten ja alueellisten ekosysteemiobservatorioiden muodostama verkosto tuottaa tietoa ennustemallien tueksi, jolloin biodiversiteetin, ekosysteemipalveluiden ja sosio-ekonomisten mittareiden tilasta voidaan tuottaa sääennusteiden kaltaisia arvioita tulevaisuudesta. Päätöksentekijöiden tehtäväksi jää silloin sopeuttaa toimintaa vallitseviin olosuhteisiin.

Uusista teknologioista kannattaa ottaa kaikki hyöty irti uudistettaessa biodiversiteettiseurantoja, mutta samaan aikaan on tärkeää turvata aikasarjojen ja vertailukelpoisen tiedon jatkuvuus. Kaikkein tärkeintä on turvata syvälinen luonnon tuntemus ja huolehtia riittävän asiantuntijajoukon koulutuksesta – ymmärrystä lajien, luontotyyppien ja ekologisten vuorovaikutusten kauaskantoisista vaikutuksista ei voi korvata koneilla.

Kiitokset

Työtä ovat tukeneet IBC-CARBON –hanke (nro. 312559), jota rahoittaa strategisen tutkimuksen neuvosto, joka toimii Suomen Akatemian yhteydessä, sekä Suomen ekosysteemiobservatorio – Vaihe 1, jota on rahoitettu Ympäristöministeriön tiedonhallintahankkeena. Kiitokset myös Vilja Varholle arvokkaista kommentteista käsikirjoitukseen.

Lähdeviitteet:

Arslan, A.N., Tanis, C.M., Metsämäki, S., Aurela, M., Böttcher, K., Linkosalmi, M. & Peltoniemi, M. (2017): Automated Webcam Monitoring of Fractional Snow Cover in Northern Boreal Conditions, *Geosciences* 3/2017, <https://doi.org/10.3390/geosciences7030055>.

Asner, G.P., Martin, R.E., Carranza-Jiménez, L., Sinca, F., Tupayachi, R., Anderson, C.B., & Martinez, P. (2014): Functional and biological diversity of foliar spectra in tree canopies throughout the Andes to Amazon region. *New Phytologist* 204/2014, s. 127–139. <https://doi.org/10.1111/nph.12895>.

Biggs, J., Ewald, N., Valentini, A., Gaboriaud, C., Dejean, T., Griffiths, R.A., Foster, J., Wilkinson, J.W., Arnell, A., Brotherton, P., Williams, P. & Dunn, F. (2015): Using eDNA to develop a national citizen science-based monitoring programme for the great crested newt (*Triturus cristatus*). *Biological Conservation*, 183/2015, s. 19–28.

Claverie, M., Ju, J., Masek, J.G., Dungan, J.L., Vermote, E.F., Roger, J.-C., Skakun, S.V. & Justice, C. (2018): The Harmonized Landsat and Sentinel-2 surface reflectance data set. *Remote Sensing of Environment* 219/2018, s. 145–161, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.09.002>.

Dalponte, M., Bruzzone, L. & Gianelle, D. (2012): Tree species classification in the Southern Alps based on the fusion of very high geometrical resolution multispectral/hyperspectral images and LiDAR data. *Remote Sens Environ* 123/2012, s. 258–270.

Santos, D., Rodrigues, J., Furtado, V., Saleem, K., & Korotaev, V. (2019): Automated electronic approaches for detecting disease vectors mosquitoes through the wing-beat frequency, *Journal of Cleaner Production*, 217/2019, s. 767-775, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.187>.

Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F. & Bargellini, P. (2012): Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services, *Remote Sensing of Environment* 120/2012, s. 25–36, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>.

Dwyer, J., Roy, D., Sauer, B., Jenkerson, C., Zhang, H. & Lyburner, L. (2018): Analysis Ready Data: Enabling Analysis of the Landsat Archive, *Remote Sensing* 10/2018, <https://doi.org/10.3390/rs10091363>.

ESA 2018. Sentinel-2 Images the Globe Every 5 Days.

Saatavissa: https://earth.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2/news/-/asset_publisher/Ac0d/content/sentinel-2-images-the-globe-every-5-days

Frantz, D. (2019): FORCE — Landsat + Sentinel-2 Analysis Ready Data and Beyond. *Remote Sensing* 11/2019, s. 1124, <https://doi.org/10.3390/rs11091124>.

Guanter, L., Kaufmann, H., Foerster, S., Brosinsky, A., Wulf, H., Bochow, M., Boesche, N., Brell, M., Buddenbaum, H., Chabrillat, S., Hank, T., Heiden, U., Heim, B., Heldens, W., Hill, J., Hollstein, A., Hostert, P., Krasemann, H., Leitão, P. J., van der Linden, S., Mauser, W., Mielke, C., Müller, A., Oppelt, N., Roessner, S., Röttgers, R., Schneiderhan, T., Staenz, K. & Segl, K. (2016): EnMAP Science Plan, EnMAP Technical Report, GFZ Data Services, <http://doi.org/10.2312/enmap.2016.006>

Hancock, S., Armston, J., Hofton, M., Sun, X., Tang, H., Duncanson, L.I., Kellner, J.R. & Dubayah, R. (2019): The GEDI Simulator: A Large-Footprint Waveform Lidar Simulator for Calibration and Validation of Spaceborne Missions. *Earth and Space Science*, 6/2019, s. 294–310. <https://doi.org/10.1029/2018EA000506>

Harris, N.C., Mills, K.L., Harissou, Y., Hema, E.M., Gnoumou, I.T., VanZoeren, J., Abdel-Nasser, Y.I. & Doamba, B. (2019): First camera survey in Burkina Faso and Niger reveals human pressures on mammal communities within the largest protected area complex in West Africa, *Conservation Letters*, 2019, <https://doi.org/10.1111/conl.12667>.

IPBES. (2019): Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. S. Díaz, J. Settele, E. S. Brondizio E.S., H. T. Ngo, M. Guèze, J. Agard, A. Arneth, P. Balvanera, K. A. Brauman, S. H. M. Butchart, K. M. A. Chan, L. A. Garibaldi, K. Ichii, J. Liu, S. M. Subramanian, G. F. Midgley, P. Miloslavich, Z. Molnár, D. Obura, A. Pfaff, S. Polasky, A. Purvis, J. Razzaque, B. Reyers, R. Roy Chowdhury, Y. J. Shin, I. J. Visseren-Hamakers, K. J. Willis, & C. N. Zayas (toim.). IPBES secretariat, Bonn, Germany.

Karjalainen, M., Pyysalo, U., Karila, K. & Hyyppä, J. (2009): Forest biomass estimation using Alos Palsar images in challenging natural forest area in Finland. Proceedings of the 2008 Joint PI Symposium of the ALOS Data Nodes, Rhodes, Greece, 3 to 7 November 2008. ESA Special Publication SP-664. Saatavilla: <http://lib.tkk.fi/Diss/2010/isbn9789517112819/article6.pdf>

Kontula, T. & Raunio, A. (toim.). (2018): Suomen luontotyyppien uhanalaisuus 2018. Luontotyyppien punainen kirja – Osa 1: Tulokset ja arvioinnin perusteet. Suomen ympäristökeskus ja ympäristöministeriö, Helsinki. Suomen ympäristö 5/2018. 388 s. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-11-4816-3>.

Lally, H.T., O'Connor, I., Jensen, O.P. & Graham, C.T. (2019): Can drones be used to conduct water sampling in aquatic environments? A review, *Science of The Total Environment*, 670/2019, s. 569-575, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.252>

Liu, H.Y., Kobernus, M., Broday, D., & Bartonova, A. (2014): A conceptual approach to a citizens' observatory--supporting community-based environmental governance. *Environmental health*, 107/2014, [doi:10.1186/1476-069X-13-107](https://doi.org/10.1186/1476-069X-13-107).

Madritch, M.D., Kingdon, C.C., Singh, A., Mock, K.E., Lindroth, R.L. & Townsend, P.A. (2014): Imaging spectroscopy links aspen genotype with below-ground processes at landscape scales. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences* 369/2014.

Mononen, L., Vihervaara, P., Repo, T., Korhonen, K.T., Ihalainen, A. & Kumpula, T. (2017): Comparative study on biophysical ecosystem service mapping methods – A test case of carbon stocks in Finnish Forest Lapland. *Ecological Indicators* 73/2017, s. 544-553, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.10.003>.

Nagendra, H., Richard, L., Honrado, J.P., Jongman, R.H.G., Tarantino, C., Adamo, M. & Mairota, P. (2013): Remote sensing for conservation monitoring: Assessing protected areas, habitat extent, habitat condition, species diversity, and threats, *Ecological Indicators* 33/2013, s. 45-59, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.09.014>.

Navarro, L., Fernández, N., Guerra, C., Guralnick, R., Kissling, D., Londoño M.C., Muller-Krager, F., Turak, E., Balvanera, P., Costello M., Delavaud, A., El Serafy, G.Y., Ferrier, S., Geijzenborffer, I., Geller, G., Jetz, W., Kim, E.S., Kim, H.J., Martin, C., McGeoch, M., Mwampamba, T., Nel, J., Nicholson, E., Pettorelli, N., Schaeppman, M., Skidmore, A., Sousa Pinto, I., Vergara, S., Vihervaara, P., Xu, H., Yahara, T., Gill, M. & Pereira H.M. (2017): Monitoring biodiversity change through effective global coordination. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 29/2017, s. 158-169.

Natural England (2015): Great crested newts: surveys and mitigation for development projects. <https://www.gov.uk/guidance/great-crested-newts-surveys-and-mitigation-for-development-projects#when-to-survey>. Ladattu 20th July 2019.

Nevalainen, O., Honkavaara, E., Tuominen, S., Viljanen, N., Hakala, T., Yu, X., Hyyppä, J., Saari, H., Pölonen, I., Imai, N.N. & Tommaselli, A.M.G. (2017): Individual Tree Detection and Classification with UAV-Based Photogrammetric Point Clouds and Hyperspectral Imaging, *Remote Sensing* 9/2017, s. 185, <https://doi.org/10.3390/rs9030185>.

Pereira, H.M., Ferrier, S., Walters, M., Geller, G.N., Jongman, R.H.G., Scholes, R.J., Bruford, M.W., Brummitt, N., Butchart, S.H.M., Cardoso, A.C., Coops, N.C., Dulloo, E., Faith, D.P., Freyhof, J., Gregory, R.D., Heip, C., Hoöft, R., Hurtt, G., Jetz, W., Karp, D.S., McGeoch, M.A., Obura, D., Onoda, Y., Pettorelli, N., Reyers, B., Sayre, R., Scharlemann, J.P.W., Stuart, S.N., Turak, E., Walpole, M. & Wegmann, M. (2013): Essential biodiversity variables. *Science* 339/2013, s. 277–278.

- Peltoniemi, M., Aurela, A., Böttcher, K., Kolari, P., Loehr, J., Hokkanen, T., Karhu, J., Linkosalmi, M., Tanis, C.M., Metsämäki, S., Tuovinen, J-P., Vesala, T. & Arslan, A.N. (2017): Networked web-cameras monitor congruent seasonal development of birches with phenological field observations, *Agricultural and Forest Meteorology*, 249/2017, s. 334 – 347, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.10.008>.
- Qi, W., Lee, S-K., Hancock, S., Lutchke, S., Tang, H., Armston, J. & Dubayah, R. (2019): Improved forest height estimation by fusion of simulated GEDI Lidar data and TanDEM-X InSAR data, *Remote Sensing of Environment* 221/2019, s. 621-634, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.11.035>.
- Ribeiro, J.W., Sugai, L.S.M. & Campos-Cerqueira, M. (2017): Passive acoustic monitoring as a complementary strategy to assess biodiversity in the Brazilian Amazonia. *Biodiversity and Conservation*, 26/2017, <https://doi.org/10.1007/s10531-017-1390-0>.
- Roy, D.P., Wulder, M.A., Loveland, T.R., Woodcock, C.E., Allen, R.G., Anderson, M.C., Helder, D., Irons, J.R., Johnson, D.M., Kennedy, R., et al. (2014): Landsat-8: Science and Product Vision for Terrestrial Global Change Research. *Remote Sensing of Environment*, 145/2014, s. 154–172, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.001>.
- Russo, D. & Voigt, C. (2016): The use of automated identification of bat echolocation calls in acoustic monitoring: A cautionary note for a sound analysis, *Ecological Indicators*, 66/2016, s. 598-602, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.02.036>.
- Sethi, S.S., Ewers, R.M., Jones, N.S., Orme, C.D.L. & Picinali, L. (2018): Robust, real-time and autonomous monitoring of ecosystems with an open, low-cost, networked device. *Methods in Ecology and Evolution*, 9/2018, s. 2383– 2387, <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13089>.
- Tatsuya A., Lamming, J.D.L., Sutherland, W.J. (2016): Spatial Gaps in Global Biodiversity Information and the Role of Citizen Science, *BioScience* 5/2016, s. 393–400, <https://doi.org/10.1093/biosci/biw022>.
- Thomsen, P.F., & Willerslev, E. (2015): Environmental DNA – An emerging tool in conservation for monitoring past and present biodiversity, *Biological Conservation*, 183/2015, s. 4–18, doi:10.1016/j.biocon.2014.11.019.
- Tomppo E, Katila M, Mäkisara K & Peräsaari J. (2012):. The Multi-source National Forest Inventory of Finland – methods and results 2007. *Metlan työraportteja / Working Papers of the Finnish Forest Research Institute* 227. 233 s. ISBN 978-951-40-2357-6 (PDF). Saatavissa: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2012/mwp227.htm>
- Troudet, J., Vignes-Lebbe, R., Grandcolas, P. & Legendre, F. (2018): The Increasing Disconnection of Primary Biodiversity Data from Specimens: How Does It Happen and How to Handle It?, *Systematic Biology*, 6/2018, s. 1110–1119, <https://doi.org/10.1093/sysbio/syy044>.
- White, J.C., Gómez, C., Wulder, M.A. & Coops, N.C. 2010. Characterizing temperate forest structural and spectral diversity with Hyperion EO-1 data. *Remote Sensing of Environment* 7/2010, s. 1576-1589, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.02.012>.
- Wieczorek, J., Bloom, D., Guralnick, R., Blum, S., Döring, M., De Giovanni, R. Robertson, T. & Vieglais D. (2012): Darwin Core: An Evolving Community-developed Biodiversity Data Standard, *PLoS ONE*. 1/2012 e29715, doi:10.1371/journal.pone.0029715.
- Woodcock, C.E., Allen, R., Anderson, M., Belward, A., Bindschadler, R., Cohen, W., Gao, F., Goward, S.N., Helder, D. & Helmer, E. (2008): Free Access to Landsat Imagery. *Science* 320/2008, 1011a, <http://dx.doi.org/10.1126/science.320.5879.1011a>
- Wulder, M.A., Masek, J.G., Cohen, W.B., Loveland, T.R. & Woodcock, C.E., (2012): Opening the archive: how free data has enabled the science and monitoring promise of Landsat. *Remote Sensing of Environment* 122/2012, s. 2–10, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.01.010>.
- Wulder, M.A., Coops, N.C., Roy, D.P., White, J.C. & Hermosilla, T., (2018): Land cover 2.0. *International Journal of Remote Sensing* 12/2018, s. 4254–4284, <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1452075>
- Vihervaara, P., Franzese, P. P. & Buonocore, E. (2019): Information, energy, and eco-exergy as indicators of ecosystem complexity. *Ecological Modelling* 395/2019, s. 23-27.

Vihervaara, P., Auvinen, A.-P, Mononen, L., Törmä, M., Ahlroth, P., Anttila, S., Böttcher, K., Forsius, M., Heino, J., Heliölä, J., Koskelainen, M., Kuussaari, M., Meissner, K., Ojala, O., Tuominen, S., Viitasalo, M., & Virkkala, R.(2017): How Essential Biodiversity Variables and remote sensing can help national biodiversity monitoring, *Global Ecology and Conservation* 10/2017 s. 43-59.

Vihervaara, P., Mononen, L., Auvinen, A.-P., Virkkala, R., Lü, Y., Pippuri, I., Packalen P., Valbuena, R. & Valkama, J. (2015): How to integrate remotely sensed data and biodiversity for ecosystem assessments at landscape scale. *Landscape Ecology* 3/2015: s. 501-516, <http://dx.doi.org/10.1007/s10980-014-0137-5>.