

**This is an electronic reprint of the original article.**

**This reprint *may differ* from the original in pagination and typographic detail.**

**Author(s):** Timo Tokola, Markus Holopainen, Tuomas Häme, Juho Heikkilä, Jouni Siipilehto

**Title:** Taimikoiden tiedonkeruun automatisointi

**Year:** 2019

**Version:** Published version

**Copyright:** The Author(s) 2019

**Rights:** CC BY-SA 4.0

**Rights url:** <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

**Please cite the original version:**

Tokola T., Holopainen M., Häme T., Heikkilä J., Siipilehto J. (2019). Taimikoiden tiedonkeruun automatisointi. Metsätieteen aikakauskirja 2019-10252. Tieteen tori: Metsätieto ja sähköiset palvelut. 5 s. <https://doi.org/10.14214/ma.10252>

All material supplied via *Jukuri* is protected by copyright and other intellectual property rights. Duplication or sale, in electronic or print form, of any part of the repository collections is prohibited. Making electronic or print copies of the material is permitted only for your own personal use or for educational purposes. For other purposes, this article may be used in accordance with the publisher's terms. There may be differences between this version and the publisher's version. You are advised to cite the publisher's version.

Timo Tokola<sup>1</sup>, Markus Holopainen<sup>2</sup>, Tuomas Häme<sup>3</sup>, Juho Heikkilä<sup>4</sup> ja Jouni Siipilehto<sup>5</sup>

## Taimikoiden tiedonkeruun automatisointi

---

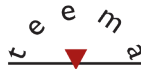
**Tokola T., Holopainen M., Häme T., Heikkilä J., Siipilehto J.** (2019). Taimikoiden tiedonkeruun automatisointi. Metsätieteen aikakauskirja 2019-10252. Tieteen tori: Metsätieto ja sähköiset palvelut. 5 s. <https://doi.org/10.14214/ma.10252>

**Yhteystiedot** <sup>1</sup>Itä-Suomen yliopisto, Metsätieteiden osasto, Joensuu; <sup>2</sup>Helsingin yliopisto, Metsätieteiden osasto, Helsinki; <sup>3</sup>Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, Espoo; <sup>4</sup>Suomen metsäkeskus, Metsävaratieto ja inventointi, Lahti; <sup>5</sup>Luonnonvarakeskus, Luonnonvarat, Helsinki

**Sähköposti** timo.tokola@uef.fi

**Hyväksytty** 30.9.2019

---



Metsätieto ja sähköiset palvelut

### Tausta

Taimikoiden etäinventointimenetelmien puutteellisuus on aiheuttanut tarpeen kehittää kaukokartoitusmenetelmiä, jotka soveltuvat nykyistä paremmin nimenomaan pienpuustojen tulkintaan. Tällä hetkellä taimikoiden ongelmallisuus pelkkään laserkeilaukseen pohjautuvissa inventointimenetelmissä johtuu puuston pienestä latvuskooosta ja puuston ryhmittyneestä tilajärjestyksestä. Ongelmia tuottaa varsinkin nuorten taimikoiden puulajisuhteiden ja runkoluvun määrittäminen. Tutkimuksissa taimikon runkoluvun keskivirhe on ollut kaksinkertainen verrattuna uudistuskypsien metsien runkoluvun keskivirheeseen. Tulosten heikkous selittyy maanpinnan ja pensaskerroksen heijastuksilla, jotka tekevät laserkeilausinventoinnin tuloksista epäluotettavia. Osin tästä syystä taimikoiden kunnostustoimenpiteiden tutkiminen etäinventointimenetelmiä apuna käyttäen on keskittynyt taimikonhoitoon eikä esimerkiksi täydennysistutukseen tai varhaisperkaukseen.

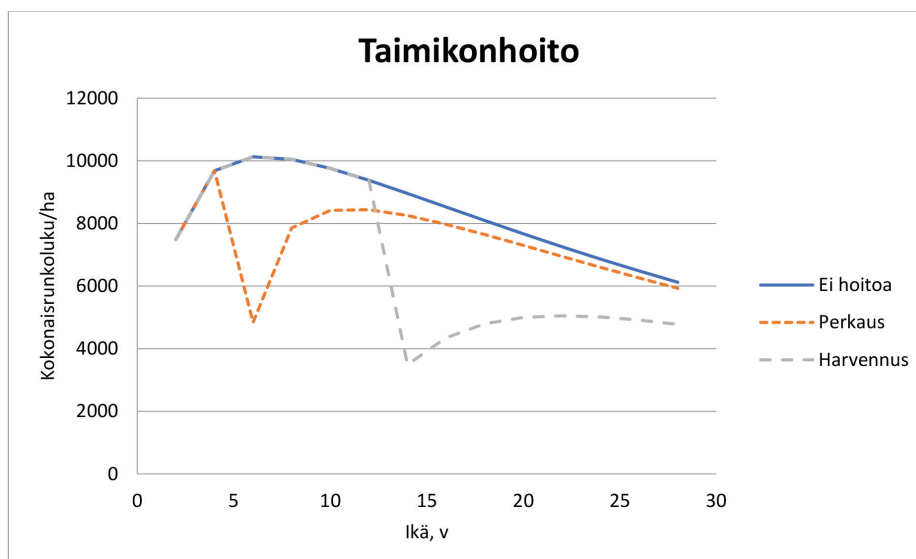
Maa- ja metsätalousministeriön taimikon tiedonkeruun kehittämishankkeen yleisenä tavoitteena oli korvata mahdollisimman suuri osa maastovierailuista uudella menetelmällä. Nykyisessä metsävaratiedossa taimikkoinventoinnit muodostavat merkittävän kustannuserän, joka on pinta-alayksikköä kohti moninkertainen verrattuna varttuneiden metsiköiden tiedonkeruuseen. Tavoitteena on tuottaa etähavainnoinnilla kerätyn tiedon pohjalta taimikon kehitys- ja hoito- toimenpide-ennusteet riittävän tarkasti operatiivista käyttöä varten ilman erillistä taimikkokoh- taista maastokäyntiä. Päätöksentekijälle toimitetaan arvio tiedon luotettavuudesta, jotta voidaan paikantaa epävarmimmat etähavainnointitulokset. Seuraavissa kappaleissa käydään läpi MMM- taimikkohankkeen keskeisiä tuloksia.

## Biometrinen mallinnus

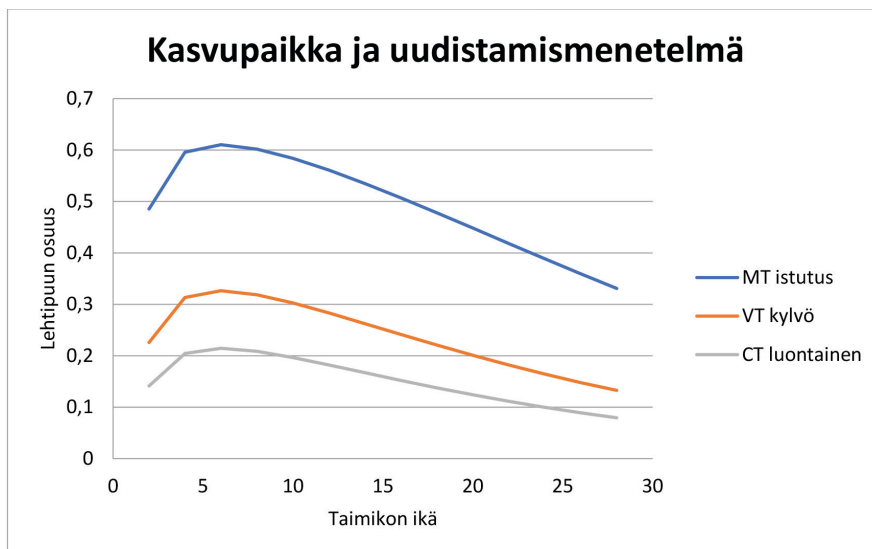
Koko taimikkoaineistosta laadittiin vaihtoehtoisia malleja kokonaisrunkoluvulle ( $\ln(N_{tot})$ ) ja lehtipuuston osuudelle ( $P$ ) sekä keskipituuden ennustamiseksi ( $\ln(H)$ ). Lehtipuuosuuden malli oli logistisen regression muotoinen ( $P=1/(1+\exp(-X'b))$ ), jolloin vastemuuttuja pysyi loogisesti välillä 0 ja 1. Vaihtoehtoisilla malleilla oli tarkoitus selvittää eri tietolähteistä poimittujen muuttujien luotettavuutta mallien selittäjinä. Kokonaistiheyttä kuvaavan mallin selityssaste ( $R^2$ ) ja keskineliövirheen neliöjuuri (RMSE) paranivat lähtötiedon tarkentuessa: 1) avoimen datan malli 15,7 % ja 0,724; 2) Valtakunnan metsien inventoinnin (VMI11) kasvupaikkatieto 20,1 % ja 0,705; 3) taimikonhoitotoimenpiteet huomioiva täydellisen tiedon malli 23,7 % ja 0,700. Logaritmisesta mallin RMSE kuvaa suhteellista virhettä.

Kuvassa 1 on MT-kasvupaikan taimikon kokonaistiheyden vaihtelu taimikon iän funktiona niin hoitamattomana kuin taimikon varhaisperkaus tai taimikon harvennus huomioiden. Taimikonhoitotoimenpiteiden dynamiikka saatiin esiin toimenpiteen ja toimenpiteestä kuluneen ajan funktiona muuttujilla  $\text{Perkaus}/(\text{Aika} + 1)$  ja  $\text{Harvennus}/(\text{Aika} + 5)$ . Perkauksen jälkeinen tiheys tuoreella kankaalla oli mallin mukaan noin 5000 ja taimikon harvennuksen jälkeen noin 3000 runkoa/ha. Perkauksen jälkeen tiheys nousi nopeasti vesomisesta johtuen. Taimikon harvennus tehtiin selvästi myöhemmin ja siksi kasvatettava puusto esti huomattavan tiheyden lisääntymisen harvennuksen jälkeen (Kuva 1).

Ojitusalueilla tiheyden muutos johtuu lähinnä taimettumis- ja kasvuolosuhteiden muutoksista. Turvemaiden kokonaistiheyden muutos ojitusajan suhteen oli hyvin samantapainen kuin perkauksen jälkeinen tiheyskehitys, mutta ojituksen vaikutus kuvattiin jatkuvan muuttujan sijaan kahden dummy-muuttujan avulla: Ojitus\_1 kuvasi muutosta ojituksen yhteydessä (aika ojituksesta 0–1 vuotta), jolloin tiheys hetkellisesti romahti, ja Ojitus\_5\_15 kuvasi ajanjaksoa 5–15 vuotta ojituksesta, jolloin tiheys oli huomattavasti keskimääräistä suurempi.



**Kuva 1.** Kokonaisrunkoluku tuoreen kasvupaikan luontaisessa taimikossa aineiston keskiarvoilla (DDY 1100 °Cv<sub>rk</sub>, meriet 120 km, mpy 130 m) ennustettuna. Vaihtoehtoisia kehityksiä on kuvattu hoitamattomalle, varhaisperatulle ja harvennetulle taimikolle. Varhaisperkaus on tehty 4 vuoden ja harvennus 14 vuoden kohdalla.



**Kuva 2.** Kasvupaikan ja taimikon syntytyavan vaikutus lehtipuuston suhteelliseen osuuteen taimikon iän funktiona ilman taimikonhoito toimenpiteitä.

Lehtipuuosuuden ennusteen esimerkki kuvattiin ilman taimikonhoitoa tyypillisillä perustamistavoilla kolmelle eri kasvupaikalle: 1) MT, istutus, 2) VT, kylvä ja 3) CT, luontainen (Kuva 2). Kasvupaikan ja puuston syntytyavan vaikutus lehtipuuosuuteen oli huomattava. Siten istutetuilla tuoreilla kankailla ja sitä paremmilla kasvupaikoilla lehtipuuosuus oli suurimmillaan 61 %, kylvetyllä kuivahkolla kankaalla vastaavasti 33 %, ja luontaisesti syntyneillä kuivilla ja tätä huonommilla kasvupaikoilla se oli suurimmillaan 21 % (Kuva 2). Myös lehtipuuosuuden muutosta voitiin kuvata taimikonhoidon ja hoidosta kuluneen ajan funktiona. Jos esimerkiksi kuivan kankaan taimikossa tehtiin harvennus, lehtipuuosuus tippui mallin mukaan 6 %:iin.

Taimikon havu- ja lehtipuuston keskipituuden kehitys saatiin varsin luotettavasti ”täydellisen tiedon” vallitessa. Havupuuston osalta selitysaste  $R^2$  oli 87 % ja RMSE 37 % ja lehtipuustolle vastaavasti 61 % ja 54 %. Etenkin havupuuston pituuskehitys oli riippuvainen syntytyavasta, taimikonhoidosta, maanmuokkauksesta ja kasvupaikasta.

## Taimikon ominaisuuksien arviointi eri kaukokartoitusmateriaalien avulla

Yksityiskohtaisen kaukokartoituksen sovelluskelpoisuutta tutkittiin useilla aineistoilla: 1) helikopterista kuvattu monikanavainen laserkeilaus (ALS Titan), 2) lennokista (unmanned aerial vehicle, UAV) kuvatut ilmakuvat ja niistä muodostetut 3D-RGB-pistepilvet sekä 3) lennokista kuvatut hyperspektriaineistot. RGB-pistepilvien ja hyperspektriaineiston yhdistelmä sekä ALS Titan-laserkeilausaineisto tuottivat melko tarkkoja estimaatteja taimikoiden tiheydelle ja pituudelle (RMSE tiheydelle n. 20 % ja pituudelle n. 10 %). RGB-pistepilvien ja hyperspektridatan yhdistelmä ja pelkkä ALS Titan -data tuottivat suurin piirtein yhtä hyviä tuloksia tiheyden ja pituuden osalta. Tulosten perusteella sekä RGB-pistepilvien että ALS-aineiston avulla on mahdollista mitata melko hyvällä tarkkuudella lehtipuiden ja havupuiden (istutettavien/kasvatettavien) puiden pituuseroa.

UAV-pistepilvien ja hyperspektridatan osalta lehdelliseen aikaan tehty kuvaus toimi paremmin sekä tiheys- (RMSE-% = 20 %) että pituusmittauksissa (RMSE-% = 11,5 %). Laserkeilauksen tapauksessa on kyse suorasta mittauksesta ja tulokset ovat erittäin lupaavia.

Satelliittikuvien avulla kartoitettiin taimikkotason vesoituneisuutta. Tulkinta perustui NDVI-kasvillisuusindeksiin, jonka korkeat arvot paljastivat vesoituneisuuden. Indeksien käytössä tunnistettiin myös muutamia virhelähteitä. Rehevimpien kasvupaikkojen kuusentaimikot sekä kuuselle istutetut pellot, joissa ei ole perkaustarvetta, saattoivat luokittua kaikkein korkeimpia vesoituneisuusasteita edustaneisiin luokkiin. Samanlainen virhetulkinta havaittiin osassa turvemaan taimikoita. Parhaan tuloksen saamiseksi satelliittikuvaus tulisi tehdä ennen lehtien kellastumisen alkamista ja täyden lehden aikaan, mikä maan eteläosissa tarkoittaa juhannuksen ja elokuun lopun välistä ajanjaksoa. Mikäli joudutaan käyttämään kuvia tämän ajanjakson ulkopuolelta, kasvillisuusindeksin (NDVI) luokkarajoja voidaan joutua muuttamaan. Eri puolilla Etelä-Suomea tehdyt kokeet viittasivat siihen, että samat indeksin raja-arvot toimivat keskikesän kuvissa ilman, että kuvia olisi kalibroitu ilmakehäkorjauksen avulla. Kokeita tehtiin kuitenkin niin vähän, että varmuutta NDVI-luokkarajojen rajojen yleispätevyydestä ei voitu saada. Menetelmän etuna on, että ilmaista satelliittikuva-aineistoa kerätään Suomesta muutaman päivän välein, jolloin pilvettömiä kuvia samasta paikasta saadaan todennäköisesti useita samalta kasvukaudelta. Hankkeen tulosten perusteella Suomen metsäkeskus on aloittanut operatiivisen vesakkokartoituspalvelun testauksen.

Aineistosta jäi vaikutelma, että nykyiset, koelohiin perustuvat taimikkojen maastoarviointimenetelmät eivät työläydestään huolimatta aina anna edustavaa kuvaa taimikon tilasta taimikoiden sisäisen heterogeenisuuden vuoksi. Koelohien käyttöä satelliittikuvantulkinnan opetusaineistona rajoittaa myös paikannuksen epätarkkuudet.

## Yhteenveto

Vaihtoehtoisia menetelmäkokonaisuuksia kustannusten ja tarkkuuden mukaan jaoteltuna on kolme:

1. Koko Suomen satelliittitulkinta ja biometrinen malli erillisenä ja yhdistettynä
2. Tarkemmat materiaalit otetaan käyttöön aineiston saatavuuden mukaan ja käytetään usein rajatun pienen alueen kontrolliin
3. Nykyinen operatiivinen ALS (n. 1 pulssi/m<sup>2</sup>) ja biometrinen mallintaminen erikseen

Ensimmäisestä kokonaisuudesta uudistamisen ajankohta saadaan luotettavasti satelliittiaikasarjasta. Biometrinen malli on suhteellisen epävarma (RMSE = 60–100 %), mutta se on tehtävissä kustannustehokkaasti kaikkialle. Paikkatietopohjaisten kosteusindeksien selitysvaimaan oli ladattu paljon odotuksia, mutta niiden merkitys jäi aika marginaaliseksi. Satelliittiperusteinen vesakkoisuusindeksin ja runkoluvun relaatio ( $R^2 = 0,2\text{--}0,3$ ) on myös melko epävarma, mutta paikalliset suhteelliset erot selviävät kasvillisuuden osalta. Tällöin ainakin vesaikkoisuuden kehitys on seurattavissa satelliittiaikasarjasta osittain. Toisen kokonaisuuden UAV-perusteisessa tarkassa rajatun pienen alueen kontrollissa ainakin kokonaisrunkoluku ennustetaan osittain erinomaisesti ( $R^2 = 0,8$ ). Menetelmän kustannukset ovat kuitenkin korkeat. Todennäköisesti UAV-kuvausten käytännön sovellukset ovat pienalueinventoinnit (esim. tilataso) sekä maastossa tehtävien koelamittausten korvaaminen. Kolmannessa olemassa olevan teknologian lentokonelaserkokonaisuudessa on olemassa useita teknologisia vaihtoehtoja. Havu- ja lehtipuun pituuden eron mallinnus on suhteellisen lupaava ( $R^2 = 0,4$ ) menetelmä ja ennustaa suoraan taimikonhoidon tarvetta. Puulajeittaiset runkoluvun ennusteet vaativat laserkeilauksen, ja tulosten puulajeittaiset keskivirheet ovat kohtuullisia (RMSE = 30–60 %), mikä tarkoittaa, että aineiston käyttö parantaa ennusteita merkittävästi.

Lupaavin menetelmä on havu- ja lehtipuun pituuseroon keskittyvä laserkeilausperusteinen malli. Jos sen perusteella simuloidaan taimikonhoidon päätöksentekotilannetta, niin luokittelu

onnistuu erittäin hyvin. Aineistosta pystyttiin tunnistamaan vakiintuneet taimikot ilman hoidettavia kohteita. Loput ennustetut ja hoidettavat taimikot sisälsivät myös n. 10 % vakiintuneita taimikoita.

Menetelmien käyttö riippuu paljolti olemassa olevasta aineistosta. Taimikkotiedon tuotanto kannattaa suunnitella siten, että biometrinen mallinnus on tuotettu pohja-aineistoksi ja estimaatteja tarkennetaan riippuen käytettävissä olevista lentokone-/lennokkipohjaisista tiedoista. Satelliitti-estimaateilla kannattaa seurata uudistamisajankohtaa ja pahimpia vesoittumiskohteita.

Tutkimukset antoivat uutta tietoa laajasti eri menetelmistä. Kerätyistä aineistoista pystytään vielä laskemaan käyttökelpoisia tuloksia seuraavissa hankkeissa. Tämän hankkeen resurssit olivat yhtä teknologiaa ja menetelmää kohti rajalliset. Kuitenkin Luonnonvarakeskuksen mallit tulevat hankkeen myötä käyttöön ja kaukokartoitusmenetelmien testit demonstroivat ansiokkaasti menetelmällisiä vaihtoehtoja.

## Kirjallisuutta

- Hou Z., Mehtätalo L., McRoberts R.E., Ståhl G., Rana P., Siipilehto J., Tokola T., Xu Q. (2019). Remote sensing-assisted data assimilation and simultaneous inference for forest inventory. Hyväksytty julkaistavaksi sarjassa Remote Sensing of Environment.
- Imangholiloo M., Saarinen N., Markelin L., Rosnell T. Näsi R., Hakala T., Honkavaara E., Holopainen M., Hyyppä J, Vastaranta M. (2019). Characterizing seedling stands using leaf-off and leaf-on photogrammetric point clouds and hyperspectral imagery acquired from unmanned aerial vehicle. *Forests* 10(5) article 415. <https://doi.org/10.3390/f10050415>.
- Korhonen L., Pippuri I., Packalén P., Heikkinen V., Maltamo M., Heikkilä J. (2013). Detection of the need for seedling stand tending using high-resolution remote sensing data. *Silva Fennica* 47(2) article 952. <https://doi.org/10.14214/sf.952>.
- Suvanto A., Maltamo M., Packalén P., Kangas J. (2005). Kuviokohtaisten puustotunnusten ennustaminen laserkeilauksella. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2005: 413–428. <https://doi.org/10.14214/ma.6138>.