

Markus Holopainen, Sakari Tuominen, Mika Karjalainen,  
Juha Hyyppä, Hannu Hyyppä, Mikko Vastaranta,  
Teppo Hujala ja Timo Tokola

## Korkearesoluutioisten E-SAR-tutkakuvien tarkkuus puustotunnusten koealatason estimoinnissa

**Holopainen, M., Tuominen, S., Karjalainen, M., Hyyppä, J., Hyyppä, H., Vastaranta, M., Hujala, T. & Tokola, T.** 2009. Korkearesoluutioisten E-SAR-tutkakuvien tarkkuus puustotunnusten koealatason estimoinnissa. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2009: 309–323.

Tutkimuksessa selvitettiin korkearesoluutioisen E-SAR-tutkakuvan tarkkuutta koealatason metsikkötunnusten estimoinnissa. E-SAR-tutkakuvaukset suoritettiin syksyllä 2000 ja keväällä 2000 ProSmart II -projektissa, jonka tarkoituksena oli tutkia tuolloin suunnitteilla olleen TerraSAR-X-satelliittisysteemin potentiaalisia sovellusalueita. Metsikkötunnusten estimointi tehtiin käyttäen ei-parametrista k:n lähimmän naapurin (k-nn) -menetelmää ja tarkkuuden arviointi ristiinvalidiointi-menetelmällä. Estimoiduista metsikkötunnuksista olivat kokonaistilavuus, puulajikohtaiset tilavuudet ja osuudet, pohjapinta-ala, keskipituus ja keskiläpimitta. E-SAR-tulkinnan tarkkuutta verrattiin numeeristen ilmakuvien sekä keski-resoluution optisen aallonpituusalueen Landsat ETM -satelliittikuvien tarkkuuteen. Maastoaineistona käytettiin 199 relaskoopikoealaa. E-SAR-estimoinnin suhteelliset RMSE-arvot olivat parhaimmillaan kokonaistilavuudelle, keskiläpimitalle, keskipituudelle ja pohjapinta-alalle 44,8 %, 27,8 %, 27,5 %, 38,3 %. Vertailuaineistona olleille numeerisille ilmakuvilla vastaavat suhteelliset RMSE-arvot olivat 49,3 %, 25,6 %, 26,5 % ja 40,6 % ja Landsat ETM -kuvilla 58,3 %, 38,5 %, 34,5 % ja 46,9 %. E-SAR-tutkakuvat toimivat parhaiten kokonaistilavuuden estimoinnissa, jossa niiden tuottama estimointitarkkuus oli huomattavasti sekä ilmakuvaa että Landsat ETM-kuvaa tarkempi. Keskiläpimitan, keskipituuden ja pohjapinta-alan estimoinnissa E-SAR-tutkakuvat sekä numeeriset ilmakuvat tuottivat suurinpiirtein yhtä tarkan tuloksen, joka oli kuitenkin huomattavasti Landsat ETM -kuvaa parempi. Puulajien tilavuuksien ja osuuksien osalta numeeriset ilmakuvat tuottivat E-SAR-kuvia tarkemman estimointituloksen.

Asiasanat: metsien inventointi, metsäsuunnittelu, tutkakuvauus, E-SAR, numeeriset ilmakuvat, Landsat  
Yhteystiedot: *Holopainen, Hujala* ja *Vastaranta*, Helsingin yliopisto, metsävarojen käytön laitos, PL 27, 00014 Helsingin yliopisto; *J. Hyyppä* ja *Karjalainen*, Geodeettinen laitos, PL 15, 02431 Masala; *H. Hyyppä*, TKK, maanmittaustieteiden laitos, PL 1200, 02015 TKK; *Tokola*, Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta, PL 111, 80101 Joensuu; *Tuominen*, Metsäntutkimuslaitos, Vantaan yksikkö, PL 18, 01301 Vantaa. Sähköposti [markus.holopainen@helsinki.fi](mailto:markus.holopainen@helsinki.fi)

Hyväksytty 18.6.2009

Saatavissa: <http://www.metla.fi/aikakauskirja/full/ff09/ff094309.pdf>

# I Johdanto

## I.1 Tutkakuvat metsävarojen inventoinnissa

Keskiresoluution optisen aallonpituusalueen satelliittikuvia on käytetty metsien inventoinnissa jo pitkään (mm. Kilkki ja Päivinen 1987, Tokola 1989, Tomppo 1990). Huolimatta satelliittikuvien tuomasta merkittävästä lisäarvosta suuralueiden inventoinnissa, yksityiskohtaisessa kartoituksessa ja operatiivisessa metsäsuunnittelussa niitä ei ole pystytty ainakaan Suomessa hyödyntämään. Suurimpana syynä tähän on se, ettei keskiresoluution satelliittikuvien numeerisella tulkinalla lukuisista yrityksistä huolimatta ole päästy riittävään kuvio- ja koelatasen tarkkuuteen. Esimerkiksi keskitilavuuden suhteellinen keskivirhe (RMSE) on kuviotasolla tyypillisesti 55 %–60 % (mm. Pussinen 1992, Holopainen ja Lukkarinen 1994, Hyypä ym. 2000), mikä ei ole riittävä tarkkuus operatiivista metsäsuunnittelua ajatellen. Koelatasolla keskivirheet ovat vielä huomattavasti korkeampia, eli 65 %–80 % (mm. Poso ym. 1999, Franco-Lopez ym. 2001, Tuominen ja Poso 2001). Alueen koon kasvaessa satelliittikuvatulkinnan keskivirheet pienenevät melko nopeasti ollen metsätilan (yli 25 ha) tasolla 10 %–20 % (Tokola ja Heikkinen 1995, Tomppo ym. 1998).

Tarkkuuden ohella toinen optisen aallonpituusalueen satelliittikuvien hyödyntämisen ongelma on kuvien hankinta pilvisissä olosuhteissa. Esimerkiksi Suomessa ei ole joka vuosi saatavilla koko maan kattavaa pilvetöntä satelliittikuvamosaiikkia. Tämä on merkittävä ongelma, varsinkin kun inventointitiedon päivittämiskiertoa halutaan kaiken aikaa nopeuttaa. Pilvisyys on erityisen suuri ongelma tropiikissa, missä työskentelee runsaasti myös suomalaisia asiantuntijoita metsävarojen inventointiin liittyvissä tehtävissä.

Tutkakuvien keskeisenä etuna optisen aallonpituusalueen kaukokartoituskuviin verrattuna on niiden saatavuus (temporaalinen resoluutio) kaikissa kuvaolosuhteissa. Tutkakuvaus, etenkin satelliitteihin sijoitetut SAR (Synthetic Aperture Radar) -tutkat, ovatkin mielenkiintoinen vaihtoehto kehitettäessä menetelmiä operatiiviseen metsävarojen inventointiin, mikäli niiden tarkkuus riittäisi koelata- ja kuviotasoon metsävaratiedon estimointiin. Satelliittitutkakuvien spatiaalinen resoluutio ei kuitenkaan

ole tähän asti ollut riittävä yksityiskohtaisen metsävaratiedon hankintaan.

Seasat-satelliitti tuotti jo vuonna 1978 ensimmäiset tutkasatelliittikuvat 25 m spatiaalisella resoluutiolla. 1980- ja 1990-luvuilla SAR-satelliittitutkien kehitys kulki kuitenkin globaalien mittakaavan päämäärien mukaisesti, mikä tarkoitti laajojen alueiden sovelluksia ilman yksityiskohtaista tietoa. SAR-satelliittitutkakuviin perustuneissa inventointitutkimuksissa keskityttiin laajojen alueiden metsäpinta-alan (mm. Rauste 1990) sekä biomassan estimointiin (mm. Rauste ym. 1994, Rauste 2006).

Viimeisen kymmenen vuoden aikana SAR-kuvia on yritetty hyödyntää myös koelata- ja kuviotasoon puustotunnusten estimoinnissa (mm. Hyypä ym. 2000, Kellendorfer ym. 2003). Yhteenvetona näistä tutkimuksista voidaan todeta Hyypän ym. (2000) tulokset, jotka osoittivat, että SAR-kuvien avulla päästiin samaan tarkkuustasoon, mitä keskiresoluution optisen alueen satelliittikuvilla (Landsat TM). Kuviotasoon keskitilavuuden suhteelliseksi keskivirheeksi saatiin 57 %, mikä oli selkeästi huonompi kuin esimerkiksi numeeristen ilmakuvien suhteellinen keskivirhe (46 %).

Profiloivien lentokonetutkien avulla päästiin jo 1990-luvulla koelata- ja jopa puutasoon mittauksissa tarkkoihin tuloksiin (mm. Hyypä 1993, Hyypä ym. 2000). Hyypä ym. (2000) vertasivat tuolloin saatavilla olevia kaukokartoitusaineistoja puustotunnusten estimoinnissa ja totesivat profiloivan tutkan olevan ainoa kaukokartoitusaineisto, jolla on mahdollista päästä kuviotasoon keskitilavuuden estimoinnissa lähellekään operatiivisen metsäsuunnittelun tarkkuusvaatimuksia. Kyseisessä tutkimuksessa profiloivan tutkan suhteellinen keskivirhe oli keskitilavuuden osalta 34 %, kuviotason arvioinnin keskivirheen ollessa 26 %. Pienen keilausalansa vuoksi profiloiva tutka ei kuitenkaan sovellu käytännön menetelmäksi operatiiviseen metsien inventointiin.

Viime vuosien merkittävin teknologiaharppaus metsävarojen inventoinnissa on ollut lähi-infran aallonpituusalueella toimivien helikopteri- ja lentokonekäyttöisten laserkeilaimien (ALS=airborne laser scanning) hyödyntäminen. Tutkimustulokset ovat osoittaneet, että niin kuviokohtaisen kokonaistilavuuden estimoinnissa (mm. Naasset 1997, 2004a, 2004b, Holmgren 2003, Suvanto ym. 2005, Packalén ja Maltamo 2006, 2007, Holopainen ym.

2008) kuin yksittäisten puiden tunnusten mittaamisessa (mm. Hyyppä ja Inkinen 1999, Maltamo ym. 2004, Hyyppä ym. 2005, 2006, 2008, Kaartinen ym. 2008) laserkeilauksella päästään puuston tilavuuden estimoinnissa ja mittauksessa vähintään samaan tarkkuustasoon kuin perinteisillä operatiiviseen metsäsuunnitteluun liittyvillä maastomittausmenetelmillä.

ALS-kuvaus tehdään suhteellisen alhaisella lentokorkeudella, joten se on pinta-alayksikköä kohden melko kallis kaukokartoitusmenetelmä. Etenkin päivityssovelluksissa, joissa tietoa kaivataan esimerkiksi useamman kerran vuodessa, tarvitaan tulevaisuudsakin laserkeilauksen lisäksi myös muuta kaukokartoitusaineistoa. Erityisen mielenkiintoisia ovat halvat, hyvän temporaalisen resoluution aineistot, joita voitaisiin hyödyntää monivaiheisessa otannassa sekä muutosten seurannassa ALS-mittausten kanssa.

Laserkeilauksen ohella myös SAR-mittausten läpimurto tapahtui 2000-luvun alussa, jolloin alettiin kehittää satelliittitutkakuvia, joiden spatiaalinen erotuskyky on parhaimmillaan 1–3 m. Parantuneen spatiaalisen erotuskyvyn lisäksi uusien SAR-satelliittikuvien keskeisenä edistysaskeleena on interferometrian ja polarimetrian hyödyntämismahdollisuus.

Interferometriassa hyödynnetään kahden hieman eri paikoista otetun SAR-kuvan vaihe-eroista syntyvää interferenssikuviota (interferogrammi), jonka avulla saadaan karkea pintamalli maaston muodoista. Metsien kohdalla pintamalli kulkee maanpinnan ja latvuston välissä riippuen käytetystä taajuudesta. Toisaalta interferometrisen SAR-kuvaparin välille voidaan laskea nk. koherenssikuva, joka kertoo interferogrammin laadusta. Jos kuvapari on otettu eri aikaan, pienetkin muutokset kohteessa, kuten oksien tai neulasten liikkuminen, pienentää kuvien välistä koherenssia. Koherenssitietoa voidaan käyttää myös puuston tilavuuden arvioinnissa, sillä tilavuuden kasvaessa kahden kuvan välinen koherenssi heikkenee.

Polarisaatiolla tarkoitetaan tutkan lähettämän säteilyn sähkökenttävektorin värähtelyn suuntautuneisuutta. SAR-tutkissa lähetetyn tai vastaanotetun säteilyn värähtelysuunta voi olla antennin asentoon nähden joko horisontaalisesti (H) tai vertikaalisesti (V) polarisoitunutta. Täyspolarimetrisessä kuvauksessa kaikki neljä lähetys- ja vastaanotokombinaatiota (HH, HV, VH ja VV) tallennetaan samanaikaisesti.

Käytännössä useita polarisaatioita voidaan hyödyntää kuvatulkinnassa samoin kuin monikanavaisen satelliittikuvan eri kanavia. Ristipolarisaatiokanavien (HV ja VH) takaisinsironnan voimakkuus on havaittu hyväksi runkotilavuuden estimaattoriksi: mitä enemmän biomassaa sitä suurempi takaisinsironta ristipolarisaatiokanavalla (Henderson ym. 1998). SAR-polarimetria ja -interferometria mahdollistavat lisäksi piirteiden, kuten esimerkiksi sirontamekanismien ja sirottajien korkeussuhteiden määrittämisen.

Ensimmäinen uuden sukupolven tutkasatelliitti, japanilainen ALOS, laukaistiin kiertoradalleen 24.1.2006. ALOS-satelliitissa on PALSAR-tutka, joka käyttää L-kaistan aallonpituusalueetta (23,6 cm). PALSAR-tutkan erotuskyky maanpinnalla on parhaimmillaan noin 10 metriä, kun käytössä on yhden polarisaation kuvausmoodi. Täyspolarimetrisessä kuvausmoodissa erotuskyky on heikompi, eli lentorataa vastaan kohtisuorassa suunnassa noin 30 metriä (Rosenqvist ym. 2007).

Kanadalainen Radarsat-2 laukaistiin radalleen 14.12.2007. Radarsat-2 on ominaisuuksiltaan parannettu versio aiemmasta Radarsat-1-satelliitista. SAR-tutka käyttää C-kaistaa, jonka aallonpituus on 5,6 cm. Merkittävin uudistus Radarsat-2-tutkassa on täyspolarimetrinen kuvaus, kun aiemmin vain HH-polarisaatio oli mahdollinen. Myös saavutettava spatiaalinen erotuskyky on parantunut ollen yhden polarisaation kuvaustilassa noin 2 m. Täyspolarimetrisessä kuvausmoodissa erotuskyky on hieman heikompi.

Saksalainen TerraSAR-X-satelliitti laukaistiin 15.6.2007. TerraSAR-satelliitin lähettämistä edelsi ProSmart II-projekti, jossa tutkittiin tuolloin suunnitella olleen TerraSAR-X-satelliittisysteemin potentiaalisia sovellusalueita erittäin korkean resoluution lentokonekäyttöisen tutkan (E-SAR) avulla. Valitettavasti ProSmart II-projektista poiketen TerraSAR-systeemiin ei toteutettu kuvausta L-kanavalla, mikä olisi ollut etenkin metsäsovellusten kannalta tärkeää. TerraSAR-X-tutkassa on vain X-kanava, jonka aallonpituus on 3,1 cm. Aikaisempiin siviileille avoimiin SAR-satelliitteihin verrattuna TerraSAR-X-tutkan merkittävin etu on nk. Spotlight-kuvausmoodi, jolla antennin lähettämää säteilyä voidaan suunnata kohteeseen pidemmän aikaa ylilennon aikana kuin normaalissa kuvausmoodissa. Spotlight-kuvausmoodi mahdollistaa näin ollen tarkemman

alueellisen erotuskyvyn: TerraSAR-X-tutkalla erotuskyky maastossa on parhaimmillaan noin metri. TerraSAR-X- tutkassa on myös täyspolarimetrinen kuvausmahdollisuus, mutta tällä hetkellä kyseinen kuvausmoodi ei ole avoin kaikille käyttäjille (Düring ym. 2008).

Ensimmäisiä tutkimustuloksia uuden sukupolven satelliittitutkakuvien tarkkuudesta metsäsovelluksissa on jo ALOS-kuvien osalta saatu. Rausteen ym. (2008) mukaan puuston runkotilavuuden estimointi oli täyspolarimetrian ansiosta hieman tarkempaa kuin aiemmalla JERS-1-satelliitilla, mutta estimointi saturoitui kuitenkin jo 150 m<sup>3</sup>/ha jälkeen. Sen sijaan RadarSat-2- tai TerraSAR-X-tuloksia ei ole vielä julkaistu.

## 1.2 Tutkimuksen tavoite

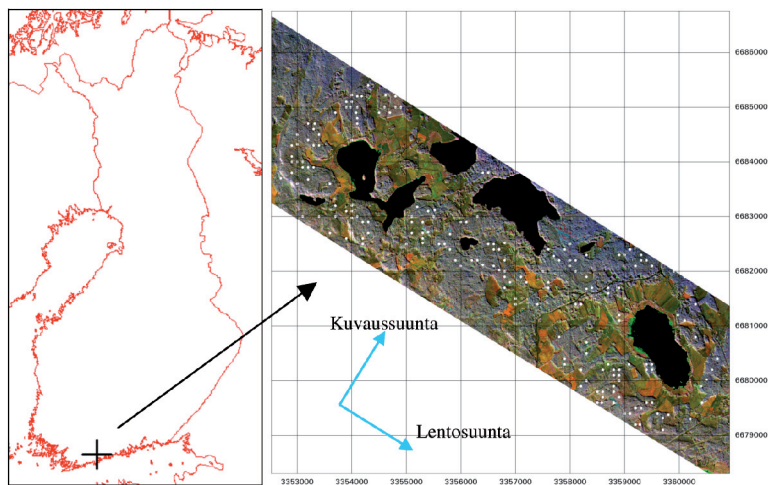
Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää kahtena eri ajankohtana (syys- ja kevätkuvaus) otettujen lentokonekäyttöisen E-SAR-tutkakuvien (L- ja X-aallonpituuskaistat) tarkkuus koealatasen metsikkötunnusten estimoinnissa. E-SAR-kuvauksen toteutti Saksan avaruustutkimuskeskus (DLR). Estimoituja metsikkötunnuksia olivat kokonaistilavuus, puulajikohtai-

set tilavuudet ja osuudet, pohjapinta-ala, keskipituus ja keskiläpimitta. Tutkimuksen tuloksia voidaan pitää ylärajana TerraSAR-X-satelliitin tulevaisuuden mahdollisuuksia arvioitaessa, koska satelliittisysteemistä puuttuu metsien kartoituksen kannalta tärkeä L-kanava.

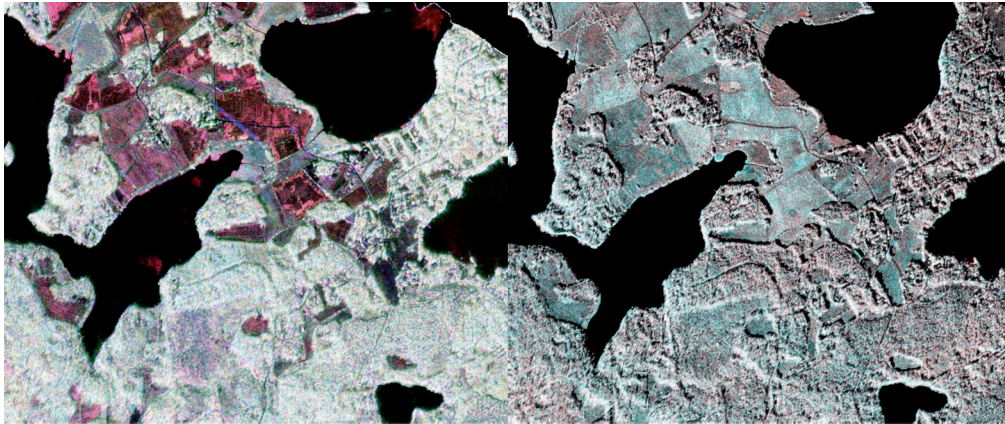
## 2 Aineistot ja menetelmät

### 2.1 Maastoaineisto

Tutkimusalue sijaitsi Kirkkonummen Lapinkylässä, noin 35 km Helsingistä länteen (kuva 1). Alue kattoi noin 1 000 ha pääasiassa pieniä talouskäytössä olevia yksityismetsätiloja. Alueelta mitattiin 199 relaskoopikoealaa kertoimella 1. Koealojen tiedot kerättiin puusto-ositteittain metsätalouden kehittämiskeskus Tapion Solmu-järjestelmän koodeja käyttäen. Koealoilta mitattiin kaikkien puiden rinnankorkeusläpimitat (lukupuut), joiden avulla muodostettiin runkolukusarjat. Kunkin puusto-ositteen keskitunnukset (rinnankorkeusläpimitta, pituus, ikä) mitattiin ositteiden pohjapinta-alan mediaanipuista, jotka valittiin mitatun runkolukusarjan perusteella.



**Kuva 1.** Vasemmalla tutkimusalueen sijainti. Oikealla esimerkki E-SAR-kuvasta, jonne on sijoitettu inventointikoealat (valkoiset pisteet) yhtenäiskoordinaattijärjestelmässä. Original image data (c) DLR and Astrium GmbH 2000, aineiston prosessointi Geodeettinen laitos ja HY.



**Kuva 2.** Vasemmalla E-SAR-tutkan L-kanavan kuva ja oikealla X-kanavan kuva. Original image data (c) DLR and Astrium GmbH 2000, aineiston prosessointi Geodeettinen laitos ja HY.

**Taulukko 1.** Tarkasteltavien tunnusten keski- ja maksimiarvot tutkimusaineistossa.

	Keskiarvo	Maksimi
Keskiläpimitta, cm	25,1	46,9
Keskipituus, m	19,1	32,1
Pohjapinta-ala, m <sup>2</sup> /ha	17,2	63,0
Kokonaistilavuus, m <sup>3</sup> /ha	160,2	547,5
Männyn tilavuus, m <sup>3</sup> /ha	50,6	364,1
Kuusen tilavuus, m <sup>3</sup> /ha	72,4	483,7
Lehtipuun tilavuus, m <sup>3</sup> /ha	37,2	241,0
Männyn osuus, %	37,1	100
Kuusen osuus, %	32,1	100
Lehtipuun osuus, %	28,3	100

Relaskoopikoealojen rajapuut tarkistettiin mittamalla. Mikäli relaskoopikoeala leikkasi selvää kuvionrajaa (alaryhmän raja, selvä kehitysluokkaero tms.) koealan keskipistettä siirrettiin pääilmansuunnassa 20 m siten, että kaikki koealaan kuuluvat puut olivat samalla kuviolla. Puusto-ositteiden mittaus-tiedoista muodostettiin puujoukot, joille laskettiin puustotunnukset MELA-metsäsuunnitteluohjelmistolla (Siitonen ym. 1996).

Koealojen poiminnassa sovellettiin ositettua otantaa, jossa osituksen perusteena käytettiin Landsat 7 -satelliittikuvan ja ilmakuvien sävyarvotietoja sekä vanhaa metsikkökuvioittain tallennettua metsäsuunnittelutietoa. Otanta kohdistettiin puustoihin koe-

aloihin, joten keskimääräiset puustotunnukset ovat jonkin verran alueen keskiarvoja korkeampia (taulukko 1). Koealat paikannettiin maastossa käyttäen orto-oikaistua ilmakuvakarttaa. Koealojen tarkka sijainti rekisteröitiin differentiaalikorjatuilla GPS-mittauksilla. Maastokoealojen mittaus ja laskenta on kuvattu myös julkaisuissa Pekkarinen ja Tuominen (2003) sekä Tokola ym. (2007).

## 2.2 Kaukokartoitusaineistot ja piirteiden irroitus

### 2.2.1 E-SAR-aineisto

E-SAR-lennot toteutettiin 31.8.2000 ja 2.5.2001. Kuvattu alue sisälsi Helsingin yliopiston metsävarojen käytön laitoksen tutkimusalueen sekä Geodeettisen laitoksen Sjökillan testikentän (kuva 2). Molemmat lennot koostuivat L-kanavasta (HH-, HV-, VV-, VH-polarisaatiot) ja X-kanavasta (HH- ja VV-polarisaatiot). Aineisto käsitti siis kaikkiaan 12 karttakoordinaattijärjestelmään (YKJ) korkeusmallin avulla oikaistua E-SAR-kuvakanavaa. Kuvien radiometrisessä kalibroinnissa käytettiin tutkimusalueella sijainneita kulmaheijastimia, ja kuvausetäisyydestä aiheutuva muutos otettiin huomioon kalibroinnissa. DLR:n raportin mukaan käytettyjen E-SAR kuvien teoreettinen erotuskyky maanpinnalla oli sekä L- että X-kanavalla 2,2 m kuvaussuunnassa. Lentosuun-

**Taulukko 2.** Tutkimuksessa käytetyt E-SAR-piirteet.

Muuttuja	Kuvaus	
1	Koala-ID	Koalan tunnusnumero
2	SARSLOPE	Maanpinnan kaltevuus tutkina suuntaan nähden
3	INCIDENCE	Säteilyn kohtauskulma koalalla
4	M_AUT_LHH	Keskimääräinen takaisinsironnan intensiteetti L-kanava HH-polarisaatio 31.8.2000 (syksy 2000)
5	M_AUT_LHV	Keskimääräinen takaisinsironnan intensiteetti L-kanava HV-polarisaatio 31.8.2000 (syksy 2000)
6	M_AUT_LVV	Keskimääräinen takaisinsironnan intensiteetti L-kanava VV-polarisaatio 31.8.2000 (syksy 2000)
7	M_AUT_LVH	Keskimääräinen takaisinsironnan intensiteetti L-kanava VH-polarisaatio 31.8.2000 (syksy 2000)
8	M_AUT_XVV	Keskimääräinen takaisinsironnan intensiteetti X-kanava VV-polarisaatio 31.8.2000 (syksy 2000)
9	M_AUT_XHH	Keskimääräinen takaisinsironnan intensiteetti X-kanava HH-polarisaatio 31.8.2000 (syksy 2000)
10	M_SPR_LHH	Keskimääräinen takaisinsironnan intensiteetti L-kanava HH-polarisaatio 2.5.2001 (kevät 2001)
11	M_SPR_LHV	Keskimääräinen takaisinsironnan intensiteetti L-kanava HV-polarisaatio 2.5.2001 (kevät 2001)
12	M_SPR_LVV	Keskimääräinen takaisinsironnan intensiteetti L-kanava VV-polarisaatio 2.5.2001 (kevät 2001)
13	M_SPR_LVH	Keskimääräinen takaisinsironnan intensiteetti L-kanava VH-polarisaatio 2.5.2001 (kevät 2001)
14	M_SPR_XVV	Keskimääräinen takaisinsironnan intensiteetti X-kanava VV-polarisaatio 2.5.2001 (kevät 2001)
15	M_SPR_XHH	Keskimääräinen takaisinsironnan intensiteetti X-kanava HH-polarisaatio 2.5.2001 (kevät 2001)
16	ALHHALVV	Kanavasuhde syksy 2000 L HH / syksy 2000 L VV
17	ALHHALHV	Kanavasuhde syksy 2000 L HH / syksy 2000 L HV
18	ALVVALHV	Kanavasuhde syksy 2000 L VV / syksy 2000 L HV
19	AXVVAXHH	Kanavasuhde syksy 2000 L HH / syksy 2000 L VV
20	ALVVAXVV	Kanavasuhde syksy 2000 L VV / syksy 2000 X VV
21	ALHHAXVV	Kanavasuhde syksy 2000 L HH / syksy 2000 X VV
22	ALHVAXVV	Kanavasuhde syksy 2000 L HV / syksy 2000 X VV
23	ALVVAXHH	Kanavasuhde syksy 2000 L VV / syksy 2000 X HH
24	ALHHAXHH	Kanavasuhde syksy 2000 L HH / syksy 2000 X HH
25	ALHVAXHH	Kanavasuhde syksy 2000 L HV / syksy 2000 X HH
26	SLHHSLVV	Kanavasuhde kevät 2001 L HH / kevät 2001 L VV
27	SLHHSLHV	Kanavasuhde kevät 2001 L HH / kevät 2001 L HV
28	SLVVS LHV	Kanavasuhde kevät 2001 L VV / kevät 2001 L HV
29	SXVVSXHH	Kanavasuhde kevät 2001 L HH / kevät 2001 L VV
30	SLVVSXVV	Kanavasuhde kevät 2001 L VV / kevät 2001 X VV
31	SLHHSXVV	Kanavasuhde kevät 2001 L HH / kevät 2001 X VV
32	SLHVSXVV	Kanavasuhde kevät 2001 L HV / kevät 2001 X VV
33	SLVVSXHH	Kanavasuhde kevät 2001 L VV / kevät 2001 X HH
34	SLHHSXHH	Kanavasuhde kevät 2001 L HH / kevät 2001 X HH
35	SLHVSXHH	Kanavasuhde kevät 2001 L HV / kevät 2001 X HH
36	ALHHSLHH	Kanavasuhde syksy 2000 L HH / kevät 2001 L HH
37	ALHHSLHV	Kanavasuhde syksy 2000 L HH / kevät 2001 L HV
38	ALHHSLVV	Kanavasuhde syksy 2000 L HH / kevät 2001 L VV
39	ALHVSLHV	Kanavasuhde syksy 2000 L HV / kevät 2001 L HV
40	ALHVSLHH	Kanavasuhde syksy 2000 L HV / kevät 2001 L HH
41	ALHVSLVV	Kanavasuhde syksy 2000 L HV / kevät 2001 L VV
42	ALVVS LVV	Kanavasuhde syksy 2000 L VV / kevät 2001 L VV
43	ALVVS LHV	Kanavasuhde syksy 2000 L VV / kevät 2001 L HV
44	ALVVS LHH	Kanavasuhde syksy 2000 L VV / kevät 2001 L HH
45	AXVVSXVV	Kanavasuhde syksy 2000 X VV / kevät 2001 X VV
46	AXHHSXHH	Kanavasuhde syksy 2000 X HH / kevät 2001 X HH
47	AXHHSXVV	Kanavasuhde syksy 2000 X HH / kevät 2001 X VV
48	AXVVSXHH	Kanavasuhde syksy 2000 X VV / kevät 2001 X HH
49	STD_ALHH	Takaisinsironnan keskihajonta L-kanava HH-polarisaatio (Syksy 2000)
50	STD_ALHV	Takaisinsironnan keskihajonta L-kanava HV-polarisaatio (Syksy 2000)
51	STD_ALVV	Takaisinsironnan keskihajonta L-kanava VV-polarisaatio (Syksy 2000)
52	STD_ALVH	Takaisinsironnan keskihajonta L-kanava VH-polarisaatio (Syksy 2000)
53	STD_AXVV	Takaisinsironnan keskihajonta X-kanava VV-polarisaatio (Syksy 2000)
54	STD_AXHH	Takaisinsironnan keskihajonta X-kanava HH-polarisaatio (Syksy 2000)
55	STD_SLHH	Takaisinsironnan keskihajonta L-kanava HH-polarisaatio (Kevät 2001)
56	STD_SLHV	Takaisinsironnan keskihajonta L-kanava HV-polarisaatio (Kevät 2001)
57	STD_SLVV	Takaisinsironnan keskihajonta L-kanava VV-polarisaatio (Kevät 2001)
58	STD_SLVH	Takaisinsironnan keskihajonta L-kanava VH-polarisaatio (Kevät 2001)
59	STD_SXVV	Takaisinsironnan keskihajonta X-kanava VV-polarisaatio (Kevät 2001)
60	STD_SXHH	Takaisinsironnan keskihajonta X-kanava HH-polarisaatio (Kevät 2001)

nassa erotuskyky oli 3,0 m L-kanavalla ja 1,8 m X-kanavalla. E-SAR-kuvassa jokaista maastopikseliä kohden oli neljä takaisinsirontahavaintoa (number of looks), mikä vähensi tutkakuvauksessa syntyvää häilyntää. Kuvien radiometrisen kalibroinnin ja oikaisun karttakoordinaatistoon teki DLR.

E-SAR-tutkakuvasta irrotetut piirteet (taulukko 2) olivat keskimääräinen takaisinsironnan intensiteetti, kanavien väliset suhteet ja takaisinsironnan intensiteetin keskihajonta. Kuvapiirteet laskettiin 10 m säteisen ympyrän sisältä, jonka oletettiin vastaavan relaskoopikoealan pinta-alaa. On huomioitava, että näin ei tarkasti ottaen ole, koska relaskoopikoeala on vaihtuväsäteinen, ts. koealan säde riippuu relaskoopikertoimen lisäksi kunkin luettavan puun läpimitasta. Relaskoopikoealat oli kuitenkin sijoitettu vähintään 20 m päähän kuviorajasta (kts. kpl. 2.1), joten kuvapiirteiden laskentayksikkö osui varmuudella kuvion sisälle.

Lentokoneesta tapahtuvassa SAR-kuvauksessa lähetetyn säteilyn kohtauskulman vaihtelu kuva-alueella on merkittävästi suurempaa kuin satelliittitutkakuvauksessa. Käytetyssä E-SAR-aineistossa kohtauskulma oli lähietäisyydellä 25° ja kauimpana SAR-antennista noin 56°. Koska kohtauskulmalla on suuri vaikutus vastaanotettuun takaisinsironnan intensiteettiin (etenkin avoimilla alueilla), laskettiin jokaiselle koelalle E-SAR-tutkan kohtauskulma kyseisellä kuvausgeometrialla. Kohtauskulman laskennassa hyödynnettiin koealan keskipisteen maastokoordinaattija, lentokorkeutta ja antennin kuvausgeometriaa. Lisäksi jokaiselle koelalle laskettiin maanpinnan kaltevuus koealan keskipisteessä antennin katselusuuntaan nähden, koska se voi kohtauskulman ohella vaikuttaa merkittävästi vastaanotettuun takaisinsirontaan. Tiheiden metsien kohdalla kohtauskulman ja varsinkin maanpinnan kaltevuuden vaikutus ei välttämättä ole kovin suuri, varsinkaan X-kanavalla, joka ei näe maanpintaa. Paikallisia kohtauskulmia ei kuitenkaan käytetty intensiteetti- ja säteilykorjaukseen, vaan niitä hyödynnettiin suoraan puustotunnusten estimointimalleissa.

## 2.2.2 Landsat-satelliittikuva

E-SAR-tutkakuvien vertailumateriaalina käytettiin optisen alueen Landsat 7 -satelliittikuvaa (path 188,

row 18), joka oli kuvattu 21.4.2000. Landsat-kuvan maastoresoluutio oli monikanavasensorin (ETM) kanavilla 1–5 ja 7 30 m, ja kanavalla 6 60 m. Pankromaattisen sensorin maastoresoluutio oli 15 m. Satelliittikuva oikaistiin yhtenäiskoordinaatistoon maastokartalta määritettyjen kiintopisteiden avulla. Tutkimuksessa käytetyt satelliittikuvapiirteet olivat pikselien sävyarvot ETM-kanavien osalta (sen pikselin arvo, jolle koealan keskipiste osui) sekä koealan keskipisteen ympäriltä irrotettu 2x2 pikselin sävyjen keskiarvo ja keskihajonta pankromaattisen kanavan osalta.

## 2.2.3 Ilmakuvat

Tutkimuksessa käytettiin kesällä 2000 kuvattuja vääräväri-ilmakuvia, joissa oli 3 kanavaa: lähi-infra, punainen ja vihreä. Kuvaus toteutettiin filmikameralla, ja kuvat digitalisoitiin skannaamalla kuvien negatiivit. Digitaaliseen muotoon muunnetut kuvat orto-oikaistiin karttatiedon ja numeerisen korkeusmallin perusteella 0,5 metrin maastoresoluutioon.

Tutkimuksessa käytetyt ilmakuvapiirteet olivat seuraavat:

1. Kunkin kanavan sävyarvojen keskiarvot irrotettuna 40×40 pikselin alueelta koealan keskipisteen ympäriltä.
2. Kunkin kanavan sävyarvojen keskihajonnat irrotettuna 40×40 pikselin alueelta koealan keskipisteen ympäriltä.
3. Tekstuuripiirteet 32×32 pikselin ikkunasta, joka oli jaettu 1×1, 2×2, 4×4 ja 8×8 pikselin kokoiisiin lohkoihin. Kuvapiirteet määritettiin em. lohkojen sävykeskiarvojen keskihajontana mukaanluettuna 4 lohkoajonnan keskihajonta.
4. Sävyarvojen yhteismatriiseihin (co-occurrence matrix) perustuvat tekstuuripiirteet angular second moment, kontrasti, entropia sekä paikallinen homogeneisuus (Haralick ym. 1973) kolmelta kanavalta 40×40 pikselin ikkunasta koealan keskipisteen ympäriltä.

## 2.3 Kuvapiirteiden normalisointi

Tutkimuksessa käytettyjen kaukokuva-aineistojen kuvapiirteiden vaihteluvälit olivat hyvin erilaisia.

Tästä syystä kuvapiirteet standardisoitiin ennen puustotunnusten estimointia siten, että kunkin kuvapiirteen keskiarvoksi tuli 0 ja keskihajonnaksi 1 (kaava 1). Käytetyllä estimointimenetelmällä ne kuvapiirteet, joiden vaihteluväli oli suuri, olisivat ilman standardisointia saaneet paljon suuremman painon suhteessa niihin kuvapiirteisiin, joiden vaihteluväli oli pieni, riippumatta kuvapiirteiden korrelaatiosta estimoitavien puustotunnusten kanssa.

$$x'_i = (x_i - \bar{x}) / s \quad (1)$$

missä

$x'_i$  = kuvapiirteen  $x$  standardoitu arvo

$x_i$  = kuvapiirteen  $x$  alkuperäinen arvo

$\bar{x}_i$  = kuvapiirteen  $x$  keskiarvo

$s$  = kuvapiirteen  $x$  keskihajonta

## 2.4 Metsikkötunnusten estimointi ja kauko-kuvapiirteiden valinta

Metsikkötunnusten estimoinnissa käytettiin  $k$ :n lähimmän naapurin ( $k$  nearest neighbors,  $k$ -nn) menetelmää (mm. Kilkki ja Päivinen 1987, Tokola ym. 1996, Franco-Lopez ym. 2001 (kaava 2)). Menetelmän lähtökohdista on oletus, että metsikkötunnusilta toistensa kanssa samankaltaiset koealat (tai metsiköt) sijaitsevat lähellä toisiaan myös kaukokartoituskuva kuvapiirteiden muodostamassa piirreavaruudessa, jonka ulottuvuuksien määrä on sama kuin kuvapiirteiden määrä. Tällöin minkä tahansa pisteen metsikkötiedot, joita ei tunneta, voidaan estimoida maastossa mitattujen referenssikoealojen avulla, joiden joukosta lähimmät naapurit poimitaan. Lähimmät naapurit määritettiin tässä tutkimuksessa euklidisten etäisyyksien perusteella kustakin kuva-aineistosta valittujen kuvapiirteiden avaruudessa.

Lähimpiä naapureita painotettiin etäisyyksien käänteisarvolla siten, että piirreavaruudessa lähimmät naapurit saivat estimoinnissa suuremman painon kuin kauempana sijaitsevat naapurit (kaava 3).

$$\hat{y} = \left( \sum_{i=1}^k w_i y_i \right) / k \quad (2)$$

missä

$\hat{y}$  = muuttujan  $y$  estimaatti

$y_i$  = muuttujan  $y$  mitattu arvo  $i$ :nneksi lähimmällä naapurikoealalla

$$w_i = \frac{1}{d_i^2} / \sum \frac{1}{d_i^2} = \text{koealan } i \text{ paino estimoinnissa} \quad (3)$$

$d_i$  = euklidinen etäisyys piirreavaruudessa  $i$ :nneksi lähimpään naapurikoealaan

$k$  = estimoinnissa sovellettu lähimpien naapurien määrä

Kuvapiirteiden valinnassa kaikilla testatuilla kauko-kuva-aineistoilla käytettiin askeltavaa edestä valintaa (*sequential forward selection*). Tässä menetelmässä kuvapiirteitä otettiin mukaan  $k$ :n lähimmän naapurin hakuun iteratiivisesti siten, että ensimmäisellä iteraatiolla valittiin kuvapiirre, joka antaa estimoinnissa tulokseksi parhaan estimaatin testattavalle inventointitunnukselle (esimerkiksi puuston tilavuus). Estimaatin hyvyyden mittarina käytettiin estimaatin RMSE-arvoa (pienin RMSE). Seuraavilla iteraatioilla valittiin aina kuvapiirre, joka jo valittujen kanssa tuotti parhaan estimointituloksen. Iterointia jatkettiin, kunnes lisäkuvapiirteiden poimiminen ei enää parantanut estimaattia, eli RMSE ei enää pienentynyt.

Kullakin kauko-kuva-aineistolla metsikkötunnuksille tuotettujen estimaattien testaustuksessa käytettiin ristiinvalidointia, jossa kullekin referenssikoealalle vuorollaan estimointia metsikkötunnukset lähimpien naapurien perusteella riippumattomina koealan mitatuista tunnuksista. Estimoidut tunnuksia verrattiin koealalta tarkasti mitattujen tunnuksien kanssa. Estimaattien testauksesta saatiin tulokseksi kunkin estimaatin tarkkuutta kuvaavat tunnusluvut RMSE (kaava 4) ja suhteellinen RMSE (kaava 5).

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (4)$$

$$\text{RMSE}\% = 100 * \frac{\text{RMSE}}{\bar{y}} \quad (5)$$

missä

$y_i$  = muuttujan  $y$  mitattu arvo koealalla  $i$

$\hat{y}_i$  = muuttujan  $y$  estimoitu arvo koealalla  $i$

$\bar{y}$  = muuttujan  $y$  mitattujen arvojen keskiarvo

$n$  = koealojen lukumäärä



Koska k-nn-menetelmässä estimointitulokset on aina jossain määrin herkkiä sovelletun k:n arvon vaikutukselle, estimoinnissa testattiin k:n arvoja 3,4 ja 5. Nämä katsottiin sopiviksi suhteessa referenssi-koelajon määrään. Liian pienet k:n arvot yleensä lisäävät estimaattien satunnaisvirhettä ja heikentävät tarkkuutta, kun taas liian suuret k:n arvot keskiarvoistavat estimaatteja liikaa, jolloin suuri osa alkuperäisen mittausaineiston vaihtelusta katoaa estimoinnissa. Täten k:n arvo on kompromissi estimaattien tarkkuuden ja estimoinnissa säilytettävän estimoitavan tunnuksen vaihtelun välillä.

## 3 Tulokset

### 3.1 Puuston keskitunnusten ja puulajiositteiden estimointitarkkuus

Puuston keskitunnusten estimointitarkkuus eri kaukokartoitusaineistoilla on esitetty taulukoissa 3–5. Lähimpien naapurien (k) lukumäärää vaihdeltiin välillä 3–5. Tarkasteltaessa taulukoita 3–5 huomataan lähimpien naapureiden lukumäärän (k:n arvo) vaikuttavan jonkin verran estimointitarkkuuteen kaikilla puustotunnuksilla ja kaikilla lähtömateriaaleilla.

**Taulukko 3.** Puuston keskitunnusten estimointitarkkuus, Landsat ETM.

		Keskilämpimitta (lpm)	Keskipituus (H)	Pohjapinta-ala (ppa)	Keskitilavuus (V)
3nn	RMSE	9,99	6,92	8,07	96,83
	RMSE%	39,86	36,14	46,86	60,44
4nn	RMSE	10,14	6,61	8,38	93,45
	RMSE%	40,45	34,51	48,66	58,33
5nn	RMSE	9,65	6,99	8,28	93,82
	RMSE%	38,51	36,49	48,08	58,56

nn = lähimpien naapurien lukumäärä

**Taulukko 4.** Puuston keskitunnusten estimointitarkkuus, ilmakekuva.

		Keskilämpimitta (lpm)	Keskipituus (H)	Pohjapinta-ala (ppa)	Keskitilavuus (V)
3nn	RMSE	6,66	5,20	6,99	81,51
	RMSE%	26,56	27,19	40,61	50,87
4nn	RMSE	6,44	5,08	7,26	81,25
	RMSE%	25,69	26,54	42,14	50,71
5nn	RMSE	7,04	5,07	7,28	79,04
	RMSE%	28,10	26,48	42,29	49,33

nn = lähimpien naapurien lukumäärä

**Taulukko 5.** Puuston keskitunnusten estimointitarkkuus, E-SAR.

		Keskilämpimitta (lpm)	Keskipituus (H)	Pohjapinta-ala (ppa)	Keskitilavuus (V)
3nn	RMSE	6,97	5,26	7,30	72,45
	RMSE%	27,80	27,46	42,38	45,22
4nn	RMSE	7,27	5,44	6,59	71,85
	RMSE%	29,01	28,44	38,28	44,82
5nn	RMSE	7,38	5,28	6,67	74,35
	RMSE%	29,45	27,59	38,72	46,41

nn = lähimpien naapurien lukumäärä

**Taulukko 6.** Puulajiositteiden estimointitarkkuus, Landsat ETM.

		ma-osuus %	ku-osuus %	lp-osuus %	ma-tilavuus	ku-tilavuus	lp-tilavuus
3nn	RMSE	40,97	26,65	28,43	63,05	74,68	44,67
	RMSE%	110,51	81,72	100,57	124,58	103,11	120,02
4nn	RMSE	39,48	25,19	29,01	63,02	74,04	43,52
	RMSE%	106,50	77,23	102,60	124,51	102,22	116,94
5nn	RMSE	39,29	25,04	28,34	61,08	73,85	43,20
	RMSE%	105,99	76,79	100,26	120,69	101,96	116,08

nn = lähimpien naapurien lukumäärä

**Taulukko 7.** Puulajiositteiden estimointitarkkuus, ilmakuva.

		ma-osuus %	ku-osuus %	lp-osuus %	ma-tilavuus	ku-tilavuus	lp-tilavuus
3nn	RMSE	26,31	25,33	22,10	47,78	64,13	33,18
	RMSE%	70,97	77,66	78,16	94,40	88,54	89,16
4nn	RMSE	28,24	25,32	21,18	42,53	63,79	34,32
	RMSE%	76,17	77,64	74,92	84,03	88,08	92,21
5nn	RMSE	27,75	26,02	21,42	45,06	64,10	34,99
	RMSE%	74,87	79,79	75,75	89,03	88,50	94,00

nn = lähimpien naapurien lukumäärä

**Taulukko 8.** Puulajiositteiden estimointitarkkuus, E-SAR.

		ma-osuus %	ku-osuus %	lp-osuus %	ma-tilavuus	ku-tilavuus	lp-tilavuus
3nn	RMSE	32,33	27,14	24,45	50,76	70,90	37,86
	RMSE%	87,22	83,22	86,47	100,30	97,89	101,71
4nn	RMSE	30,31	27,59	24,36	46,91	73,78	40,52
	RMSE%	81,77	84,61	86,15	92,69	101,86	108,88
5nn	RMSE	31,41	26,05	24,50	52,98	75,12	40,62
	RMSE%	84,74	79,89	86,66	104,68	103,72	109,13

nn = lähimpien naapurien lukumäärä

Paras k:n arvo vaihtelee muuttujasta ja aineistosta riippuen.

E-SAR-estimoinnin suhteelliset RMSE-arvot (taulukko 5) olivat parhaimmillaan kokonaistilavuudelle, keskiläpimitalle, keskipituudelle ja pohjapinta-alalle 44,8 %, 27,8 %, 27,5 %, 38,3 %. Vertailuaineistona olleille numeerisille ilmakeuille (taulukko 4) vastaavat suhteelliset RMSE-arvot olivat 49,3 %, 25,7 %, 26,5 % ja 40,6 % ja Landsat ETM -kuville (taulukko 3) 58,3 %, 38,5 %, 34,5 % ja 46,9 %. Näyttää siis siltä, että E-SAR-tutkakuvat toimivat parhaiten kokonaistilavuuden estimoinnissa, jossa sen antama estimointitarkkuus on sekä ilmakevää et-

tä Landsat ETM-kuvaa tarkempi. Sen sijaan keskiläpimitalta, keskipituuden ja pohjapinta-alan estimoinnissa E-SAR-tutkakuvat sekä numeeriset ilmakeuvat antavat suurinpiirtein yhtä tarkan tuloksen, joka on kuitenkin Landsat ETM -kuvaa parempi.

Puulajiositteita estimointiin kahdella tavalla: puulajiosuuskien sekä puulajien tilavuuksien kautta (taulukot 6–8). Tarkasteltaessa eri kaukokartoitusaineistojen puulajiositteiden estimointitarkkuutta huomataan tulosten olevan kauttaaltaan huomattavasti huonompia kuin keskitunnusten estimointitarkkuuden. Puulajiosuudet pystytään estimoimaan kaikilla materiaaleilla tarkemmin kuin puulajien tilavuudet.

Parhaaseen tulokseen päästään numeeristen ilmakuvien avulla (taulukko 7), joilla puulajiosuuksien suhteelliset RMSE-arvot olivat 71,0 % (mänty), 77,6 % (kuusi) ja 74,9 % (lehtipuut). Seuraavaksi paras tulos saatiin E-SAR-kuvien avulla (taulukko 8), jolla vastaavat suhteelliset RMSE-arvot olivat 81,8 % (mänty), 79,9 % (kuusi) ja 86,2 % (lehtipuut). Kuusen osuutta lukuunottamatta Landsat ETM-kuvilla (taulukko 6) päädyttiin jälleen huonoimpaan tulokseen, 106,0 % (mänty) 76,8 % (kuusi) ja 100,3 % (lehtipuut).

Standardoidut piirteet toimivat myös puulajiositteiden estimoinnissa lähes aina alkuperäisiä kaukokartoituspiirteitä paremmin.

Käytettyä piirrevalintamenetelmää (edestä valintaa) sovellettaessa saattaa algoritmi pysähtyä vain yhden tai kahden piirteen jälkeen, jos yksikään uusi piirre ei tuota parannusta estimaatin tarkkuuteen. Landsat ETM -satelliittikuvalla näin tapahtui usein, varsinkin kun käytettiin standardoimattomia kuvapiirteitä, jolloin kuvapiirteiden vaihteluvälin erilaisuus vaikutti kuvapiirteiden painotukseen. Landsat ETM -satelliittikuvalla metsikön keski- ja kokonaistunnuksia (keskiläpimita, keskipituus, pohjapinta-ala ja kokonaistilavuus) estimoivat parhaiten ETM-kanavat 5 ja 6, havupuiden tilavuutta ja osuutta ETM-kanava 3 ja Pan, ja lehtipuun tilavuutta ja osuutta ETM-kanavat 2 ja 4.

Ilmakuvalla metsikkötunnuksia estimoivat parhaiten pikselilohkojen hajontaan ja yhteismatriiseihin perustuvat tekstuuripiirteet. Pohjapinta-alaa ja tilavuutta estimoivat parhaiten punaisen kanavan sävyarvo yhdessä edellisten kanssa. Havupuiden tilavuutta ja osuutta estimoivat parhaiten yhteismatriiseihin (ja toissijaisesti pikseliblokkien hajontaan) perustuvat tekstuuripiirteet yhdessä vihreän kanavan sävyarvojen kanssa. Lehtipuun tilavuuden ja osuuden estimoinnissa ensisijaisesti valituksi tulivat yhteismatriiseihin (ja toissijaisesti pikseliblokkien hajontaan) perustuvat tekstuuripiirteet ja toissijaisesti vihreän kanavan sävyarvo, mutta yllättävästi lähi-infrakanavan sävy ei ollut ensimmäisinä poimittujen piirteiden joukossa. Kaiken kaikkiaan ilmakuvien tekstuuripiirteet olivat estimoinnissa sävyarvoja tärkeämpiä muuttujia.

E-SAR-satelliittikuvalla puiden dimensiota estimoivat parhaiten saman ajankohdan kuvien eri polarisaatioiden kanavasuhteet. Pohjapinta-alaa estimoivat

parhaiten intensiteetti L-kanavan HV-polarisaatiolla sekä takaisinsironnan keskihajonnat L-kanavan eri polarisaatioilla. Tilavuutta estimoivat parhaiten L-kanavan intensiteetti HH-polarisaatiolla sekä kanavasuhde L-HH/L-HV. Havupuiden tilavuutta ja osuutta estimoivat parhaiten takaisinsironnan keskihajonta X-kanavan VV-polarisaatioilla ja takaisinsironnan intensiteetti L-kanavan VV-polarisaatioilla. Lehtipuun tilavuuden estimoinnissa paras piirre oli takaisinsironnan keskihajonta X-kanavan HH-polarisaatiolla ja lehtipuuosuuden estimoinnissa parhaat piirteet olivat syksykuvan kanavasuhteet L-HH/L-VV ja L-HH/X-VV.

## 4 Tulosten tarkastelu ja johtopäätökset

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää lentokonekäyttöisen E-SAR-tutkakuvan tarkkuutta koealaston puustotunnusten estimoinnissa. Vertailuaineistona käytettiin optisen aallonpituusalueen numeerisia ilmakuvia sekä keskiresoluution Landsat ETM -satelliittikuva-aineistoa.

Yhteenvedona keskitunnusten estimointituloksista voidaan sanoa, että etenkin puuston koealakohtaisen keskitilavuuden estimointi onnistuu E-SAR-piirteiden avulla paremmin kuin numeerisilla ilmakuvilla ja Landsat ETM -kuvilla (suhteelliset RMSE:t 44,8 %, 49,3 % ja 58,3 %). Koealaston keskitunnusten, eli keskitilavuuden, -pituuden, -läpimitan ja pohjapinta-alan tulkintatarkkuudet olivat yleensä ottaen hieman parempia kuin ilmakuvaestimaattien tarkkuudet ja huomattavasti parempia kuin Landsat ETM -kuvan tarkkuus.

Tutkimuksen tarkkuusestimaatteja voi arvioida vertaamalla niitä perinteisen kuvioittaisen arvioinnin tarkkuuteen. Kuvioittaisen arvioinnin keskivirheen on todettu useassa eri tutkimuksessa vaihtelevan puuston keskitilavuuden osalta 16–38 % välillä (Poso 1983, Laasasenaho ja Päivinen 1986, Pussinen 1992, Haara ja Korhonen 2004, Saari ja Kangas 2005).

Yksi metsäsuunnittelussa hyödynnettävän kuvioittaisen arvioinnin keskeinen ongelmakohta on puulajiositteiden inventointitarkkuus. Esimerkiksi

Haara ja Korhonen (2004) saivat männyn, kuusen ja koivun suhteelliseksi keskivirheiksi kuvioittaisessa arvioinnissa 29,3 %, 43 % ja 65 %, harhan ollessa vastaavasti -5,5 %, 4,4 % ja 5,7 %. Metsäsuunnittelun lähtötiedon hankinnassa ollaan parhaillaan ottamassa käyttöön piirre-/aluepohjaista ALS-estimointia, jolla puuston keskitilavuus pystytään tulkitsemaan tarkemmin kuin perinteisellä kuvioittaisella arvioinnilla. Sen sijaan puulajiositetason tiedon estimointitarkkuus on perinteisen kuvioittaisen arvioinnin tasoa, eli huomattavasti heikompa kuin kokonaistilavuuden estimointitarkkuus. Packalénin ja Maltamon (2007) mukaan koelatasolla puulajiositteiden suhteellinen keskivirhe vaihteli välillä 51 %–102 %. Holopainen ym. (2008) puolestaan saivat ALS- ja ilmakuviopohjaisiin perustuneella k:n-tulkinnalla puulajiositteiden (mänty, kuusi, lehtipuu) tarkkuudeksi koelatasolla 70–72 %.

Tässä tutkimuksessa puulajiosuuskien estimoinnissa numeerinen ilmakuva (71,0 %–77,6 %) antoi tarkemman tuloksen kuin E-SAR-kuva (79,9 %–86,2 %). Vaatimattomasta tulkintatarkkuudesta huolimatta, tulokset ovat kuitenkin linjassa edellä esitettyjen kuvioittaisen arvioinnin ja piirre pohjaisen ALS-menetelmän puulajiositteiden tulkintatarkkuuksien kanssa.

Tokola ym. (2007) vertasivat E-SAR-tutkakuvan, Landsat ETM -satelliittikuvan ja numeerisen ilmakuvan tulkintatarkkuutta puuston kokonaistilavuuden estimoinnissa. Heidän tutkimuksessaan ilmakuva- ja Landsat ETM -estimointi tuotti n. 51–62 %:n koelatasoon tulkintatarkkuuden. Hyödynnettäessä metsäsuunnitelmasta saatua a priori tietoa E-SAR-estimoinnissa päästiin parhaimmillaan n. 35 %:n suhteelliseen RMSE:n. Toisaalta ilman a priori -tietoa E-SAR-estimointi ei toiminut, sillä tilavuuden suhteellinen RMSE oli 119,1 %.

Tokolan ym. (2007) tutkimuksessa E-SAR-tulkinnan lähtökohtana oli puulajikohtainen heijastusmalli, jolla kuvattiin tutkasäteen heijastumista erilaisista metsiköistä (Sun ym. 1995, Picard 2002). Heijastusmallia hyödynnettiin estimoitaessa puuston tilavuus tutkapiirteiden (mm. L-kanavan HH- ja VV-polarisaatiot) avulla. Tutkapiirteiden irroituksessa käytettiin ecognition-ohjelmistolla tehtyä segmentointia. Huonona puolena heijastusmallin käytössä oli sen aineistokohtaisuus, eli yhdellä alueella tehtyä mallia ei voitu hyödyntää toisella alueella, vaan

estimointi vaati tuekseen maastoaineistoa tulkinnan kohteena olevalta alueelta.

E-SAR-tulkinnan tarkkuus oli tutkimuksessa kokonaistilavuuden osalta hieman huonompi kuin mitä se oli Tokola ym. (2007) tutkimuksessa. Toisaalta todennäköisesti olemassa olevan kuviotietokannan hyödyntäminen (a priori -tieto) estimoinnissa olisi parantanut tuloksia hieman. Muiden puustotunnusten osalta vertailua ei voida tehdä, koska Tokolan ym. (2007) estimoivat pelkästään puuston kokonaistilavuutta. Näiden kahden tutkimuksen maastoaineisto oli osittain sama, joten tulokset ovat keskenään melko vertailukelpoisia.

Tutkimuksessa käytössä olleilla E-SAR-kuvilla jäljiteltiin silloin suunnitteilla ollutta TerraSAR-satelliittisysteemiä. Nyt TerraSAR-X satelliitti on laukaistu, mutta harmillisesti metsien kartoituksen kannalta L-kanava, joka olisi E-SAR-tulosten perusteella tärkempi kuin X-kanava, on jätetty satelliittisysteemistä pois. Tilanne kuitenkin vaikuttaa paremmalta, kun huomioidaan uuden sukupolven SAR-satelliittisysteemien mahdollinen yhteiskäyttö (ALOS, Radarsat-2 ja TerraSAR-X). Ensinnäkin täyspolarimetrinen kuvaus on tullut operatiiviseksi ALOS- ja Radarsat-2-systeemeissä. Toiseksi eri satelliittien avulla voidaan saada kuvia kohteesta eri aallonpituusalueella (X-, C- ja L-kanavat). Näin ollen tutkittavasta kohteesta on mahdollista saada huomattavasti moniulotteisempaa tietoa kuin aiemmillä SAR-satelliittisysteemeillä, mikä oletettavasti parantaa estimointitarkkuutta myös metsien kartoituksessa. Kolmanneksi alueellinen erotuskyky SAR-satelliittikuvissa on tarkentunut jopa metrin luokkaan, mutta tällöin joudutaan tyytymään yhden polarisaation kuvaukseen. Tulevaisuudessa varsinkin SAR-interferometri ja -polarimetri hyödyntäminen vaikuttavat lupaavilta menetelmiltä (Krieger ym. 2005).

Metsävarojen inventoinnin keskeinen kysymys on muutostulkinta, eli metsävaratiedon päivitys. Puustotietojen lisäksi ollaan kaiken aikaa kiinnostuneempia myös biomassan, bioenergian ja hiilitaseen muutoksista. Ilmastonmuutoksen myötä todennäköisesti myös erilaiset metsätuhot tulevat yleistyämään, jolloin niidenkin seurantamenetelmille on varmasti kysyntää.

Tutkimuksen tuloksia tarkasteltaessa tulee huomioida tulosten aineistokohtaisuus. Oman rajoitteen-

sa tulosten yleistämiseksi aiheuttaa myös puustotunnusten laskentaan liittyvä epävarmuus maastoreferenssinä käytetyillä relaskoopikoealoilla. Näin ollen tutkimuksessa esitetyt kaukokartoitustulkinnan tarkkuudet ovat absoluuttisilta arvoiltaan vain suuntaa antavia. Tutkimuksen tulokset antavat lähökohdan tulevaisuudessa tehtäville TerraSar-tutkimuksille sekä alustavan arvion korkearesoluutioisen tutkakuvauksen tarkkuudesta verrattuna sitä optisen aallonpituusalueen ilma- ja satelliittikuviiin.

Jatkotutkimuksissa tulee testata, kuinka lähelle E-SAR-tuloksia päästään TerraSAR-X-satelliittikuvilla, vaikkakin on odotettavissa, että L-kanavan puutumisen heikentää estimointitarkkuutta. Tulevaisuuden tutkimusaiheita ovat myös segmentoinnin hyödyntäminen tutkapiirteiden irroituksessa, piirteiden valintamenetelmien kehittäminen sekä korkearesoluutioisten tutkasatelliittikuvien hyödyntäminen yhdessä ALS-aineistojen kanssa.

## Kirjallisuus

- Düring, R., Koudogbo, F.N. & Weber, M. 2008. TerraSAR-X and TanDEM-X revolution in spaceborne radar. Proceedings of the ISPRS XXI Congress, Beijing, China.
- Franco-Lopez, H., Ek, A.R. & Bauer, M.E. 2001. Estimation and mapping of forest density, volume and cover type using the k-nearest neighbors method. *Remote Sensing of Environment* 77: 251–274.
- Fransson, J.E.S., Magnusson, M., Olsson, H., Eriksson, L.E.B., Sandberg, G., Smith-Jonforsen & G., Ulander, L.M.H. 2007. Detection of forest changes using ALOS PALSAR satellite images. *Julkaisussa: Proc. IEEE IGARSS Geoscience and Remote Sensing Symposium 2007, Barcelona 23–28 July 2007.* s. 2330–2333.
- Haara, A. & Korhonen, K. 2004. Kuvioittaisen arvioinnin luotettavuus. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2004: 489–508.
- Haralick, R. M., Shanmugan, K. & Dinstein, I. 1973. Textural features for image classification. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* 3: 610–621.
- Henderson, Floyd M., Lewis & Anthony, J. (eds.). 1998. Principles & applications of imaging radar, manual of remote sensing. Volume 2. Third edition. John Wiley & Sons, Inc. ISBN 0-471-29406-3.
- Holmgren, J. 2003. Estimation of forest variables using airborne laser scanning. PhD thesis. Acta Universitatis Agriculturae Sueciae, Silvestria 278. Swedish University of Agricultural Sciences, Umeå, Sweden.
- Holopainen, M. & Lukkarinen, E. 1994. Digitaalisten ilmakuvien käyttö metsävarojen inventoinnissa. Helsingin yliopiston metsävarojen käytön laitoksen julkaisuja 4.
- , Haapanen, R., Tuominen, S. & Viitala, R. 2008. Performance of airborne laser scanning- and aerial photograph-based statistical and textural features in forest variable estimation. *Julkaisussa: Hill, R., Rossette, J. & Suárez, J. Silvilaser 2008 proceedings.* s. 105–112.
- Hyypä, J. 1993. Development and feasibility of airborne ranging radar for forest assessment. Helsinki University of Technology, Laboratory of Space Technology, 112 s. ISBN 951-22-1888-7.
- & Inkinen, M. 1999. Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner. *The Photogrammetric Journal of Finland* 16: 27–42.
- , Hyypä, H., Inkinen, M., Engdahl, M., Linko, S. & Zhu, Y-H. 2000. Accuracy comparison of various remote sensing data sources in the retrieval of forest stand attributes. *Forest Ecology and Management* 128: 109–120.
- , Mielonen, T., Hyypä, H., Maltamo, M., Yu, X., Honkavaara, E. & Kaartinen, H. 2005. Using individual tree crown approach for forest volume extraction with aerial images and laser point clouds. *Julkaisussa: Proceedings of ISPRS Workshop Laser Scanning 2005, September 12–14, 2005, Enschede, Netherlands, XXXVI, Part 3/W19.* s. 144–149.
- , Yu, X., Hyypä, H. & Maltamo, M. 2006. Methods of airborne laser scanning for forest information extraction. *EARSel SIG Forestry. Julkaisussa: International Workshop 3D Remote Sensing in Forestry Proceedings, Vienna, 14–15 Feb. 2006.* s. 63–78.
- , Hyypä, H., Leckie, D., Gougeon, F., Yu, X. & Maltamo, M. 2008. Review of methods of small-footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests. *International Journal of Remote Sensing* 29: 1339–1366.
- Kaartinen, H., Hyypä, J., Liang, X., Litkey, P., Kukko, A., Yu, X., Hyypä, H. & Holopainen, M. 2008. Accuracy of automatic tree extraction using airborne laser scanner data. *Julkaisussa: Hill, R., Rossette, J. & Suárez, J. Silvilaser 2008 proceedings.* s. 467–476.

- Kellndorfer, J.M., Dobson, M.C., Vona, J.D. & Clutter, M. 2003. Toward precision forestry: plot-level parameter retrieval for slash pine plantations with JPL AIRSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41(7): 1571–1582.
- Kilkki, P. & Päivinen, R. 1987. Reference sample plots to combine field measurements and satellite data in forest inventory. Department of Forest Mensuration and Management, University of Helsinki. *Research Notes* 19: 210–215.
- Krieger, G., Papathanassiou, K. & Cloude, S.R. 2005. Spaceborne polarimetric SAR interferometry: performance analysis and mission concepts. *EURASIP Journal on Applied Signal Processing* 2005(20): 3272–3292.
- Laasasenaho, J. & Päivinen, R. 1986. Kuvioittaisen arvioinnin tarkistamisesta. *Folia Forestalia* 664. 19 s.
- Maltamo, M., Eerikäinen, K., Pitkänen, J., Hyypä, J. & Vehmas, M. 2004. Estimation of timber volume and stem density based on scanning laser altimetry and expected tree size distribution functions. *Remote Sensing of Environment* 90: 319–330.
- Næsset, E. 1997. Estimating timber volume of forest stands using airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment* 51: 246–253.
- 2004a. Practical large-scale forest stand inventory using a small footprint airborne scanning laser. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19: 164–179.
- 2004b. Accuracy of forest inventory using airborne laser-scanning: evaluating the first Nordic full-scale operational project. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19: 554–557.
- Packalén, P. & Maltamo, M. 2006. Predicting the plot volume by tree species using airborne laser scanning and aerial photographs. *Forest Science* 56: 611–622.
- & Maltamo, M. 2007. The k-MSN method in the prediction of species specific stand attributes using airborne laser scanning and aerial photographs. *Remote Sensing of Environment* 109: 328–341.
- Pekkarinen, A. & Tuominen, S. 2003. Stratification of a forest area for multisource forest inventory by means of aerial photographs and image segmentation. *Julkaisussa: Corona, P., Köhl, M. & Marchetti, M. (eds.). Advances in forest inventory for sustainable forest management and biodiversity monitoring. Forestry Sciences* 76. Kluwer Academic Publishers. s. 111–123.
- Poso, S. 1983. Kuvioittaisen arvioimismenetelmän perusteita. *Silva Fennica* 17: 313–343.
- , Wang, G. & Tuominen, S. 1999. Weighting alternative estimates when using multi-source auxiliary data for forest inventory. *Silva Fennica* 33(1): 41–50.
- Pussinen, A. 1992. Ilmakuvat ja Landsat TM-satelliittikuvat välialueiden kuvioittaisessa arvioinnissa. Syventävien opintojen tutkielma. Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta. 48 s.
- Rauste, Y. 1990. Incidence-angle dependence in forested and non-forested areas in Seasat SAR data. *International Journal of Remote Sensing* 11: 1267–1276.
- 2006. Techniques for wide-area mapping of forest biomass using radar data. Dissertation for the degree of Doctor of Science in Technology. VTT Publications 591.
- , Häme, T., Pulliainen, J., Heiska, K. & Hallikainen, M. 1994. Radar-based forest biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing* 15: 2797–2808.
- , Lönnqvist, A., Molinier, M., Ahola, H. & Häme, T. 2008. ALOS Palsar data in boreal forest monitoring and biomass mapping. *Proceedings of 1st Joint PI Symposium of ALOS Data Nodes, Kyoto, Japan, 19–23 Nov. 2007.*
- Rosenqvist, A., Shimada, M., Ito, N. & Watanabe, M. 2007. ALOS PALSAR: a pathfinder mission for global-scale monitoring of the environment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 45(11): 3307–3316.
- Saari, A. & Kangas, A. 2005. Kuvioittaisen arvioinnin harhan muodostuminen. *Metsätieteen aikakauskirja* 1/2005: 5–18.
- Siitonen, M., Härkönen, K., Hirvelä, H., Jämsä, J., Kilpeläinen, H., Salminen, O. & Teuri, M. 1996. MELA handbook, 1996 edition. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 622. 452 s.
- Suvanto, A., Maltamo, M., Packalén, P. & Kangas, J. 2005. Kuviokohtaisten puustotunnusten ennustaminen laserkeilauksella. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2005: 413–428.
- Tokola, T. 1989. Satelliittikuvien käyttö koealaotantaan perustuvassa suuralueiden inventoinnissa. *Metsätalouden suunnittelun syventävien opintojen tutkielma. Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta.* 72 s.
- & Heikkilä, J. 1995. Satelliittikuvainventoinnin puuston tilavuusestimaattien luotettavuus tilatasolla. *Julkaisussa: Korhonen, K. & Mäkelä, P. (toim.). Metsien eri käyttömuodot yhdistävä suunnittelu. Metsäntutkimuspäivä Joensuussa 1995. Metsäntutkimuslaitoksen*

tiedonantoja 568: 23–35.

- Pitkänen, J., Partinen, S., & Muinonen, E. 1996. Point accuracy of a non-parametric method in estimation of forest characteristics with different satellite materials. *International Journal of Remote Sensing* 12: 2333–2351.
- Letoan, T., Poncet, F.V., Tuominen, S. & Holopainen, M. 2007. Forest reconnaissance surveys: comparison of estimates based on simulated TerraSAR, and optical data. *Photogrammetric Journal of Finland* 20(2): 64–79.
- Tomppo, E. 1990. Designing a satellite image-aided national forest inventory. Proceedings from SNS/IUFRO workshop in Umeå 26–28 Feb. 1990. Remote Sensing Laboratory, Swedish University of Agricultural Sciences, Report 4: 43–47.
- Katila, M., Moilanen, J., Mäkelä, H. & Peräsaari, J. 1998. Kunnittaiset metsävaratiedot 1990–1994. *Metsätieteen aikakauskirja* 4B/1998: 619–839.
- Tuominen, S. & Poso, S. 2001. Improving multi-source forest inventory by weighting auxiliary data sources. *Silva Fennica* 35(2): 203–214.

#### 45 viitettä