



Pekka Hyvönen

Pekka Hyvönen

## Kuvioittaisten puustotunnusten ja toimenpide-ehdotusten estimointi *k*-lähimmän naapurin menetelmällä Landsat TM -satelliittikuvan, vanhan inventointitiedon ja kuviotason tukiaineiston avulla

**Hyvönen, P.** 2002. Kuvioittaisten puustotunnusten ja toimenpide-ehdotusten estimointi *k*-lähimmän naapurin menetelmällä Landsat TM -satelliittikuvan, vanhan inventointitiedon ja kuviotason tukiaineiston avulla. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2002: 363–379.

Tutkimuksessa tarkasteltiin Landsat TM -satelliittikuvan käyttökelpoisuutta puustotietojen sekä toimenpide-ehdotusten estimoimiseksi metsikkökuviolle ja segmenteille ei parametrisella *k*-lähimmän naapurin menetelmällä (*knn*). Satelliittikuvan informaation ohella estimoinnissa hyödynnettiin vanhan inventoinnin mukaisia puustotietoja. Tutkimuksessa vertailtiin myös satelliittikuvan sävyarvoista eri tavoin laskettujen keskiarvojen tehokkuutta estimoinnissa. Estimoinnin tukiaineisto koostui 935 kuviosta ja kohdeaineisto 921 kuviosta.

Paras estimointitulokset saatiin käyttämällä satelliittikuvan informaationa kuvioiden ydinosa-keskiarvosävyjä ja kuvioiden reunaetäisyydellä painotettujen sävyarvojen keskiarvoja sekä vanhaa inventointitietoa. Puuston keskitilavuuden keskiarveksi saatiin 42,1 % ( $51,6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ). Tarkimmin estimoitiin puuston keskiläpimitta (keskiarveksi 32,3 % (5,4 cm)), sekä keskipituus (keskiarveksi 34,1 % (4,6 m)). Nuorissa ja varttuneissa kasvatusmetsissä vastaavat keskiarveet olivat noin 10%-yksikköä pienemmät kuin koko aineistossa keskimäärin. Segmenttiestimoinnissa suhteelliset keskiarveet olivat 10–15%-yksikköä vastaavia metsikköestimointeja suuremmat.

Toimenpide-ehdotusten luokittelussa kasvatushakkuiden oikeinluokitusprosentiksi saatiin 61,3 % ja uudistamishakkuiden 64,1 %. Hoitotoimenpide-ehdotusten luokittelussa koko aineiston oikeinluokitusprosentti oli 71,2 %.

Tutkimuksessa testattu menetelmä tarjoaa nopean ja edullisen vaihtoehdon puustotunnusten ja toimenpide-ehdotusten tuottamiseksi esimerkiksi välialueiden suunnitteluun.

Asiasanat: kuvioittainen arviointi, *knn*-menetelmä, segmentointi, Landsat TM, puustotunnukset, toimenpide-ehdotukset

Yhteystiedot: Metla, Joensuun tutkimuskeskus, PL 68, 80101 Joensuu

Sähköposti pekka.hyvonen@metla.fi

Hyväksytty 5.9.2002

# I Johdanto

## I.1 Tutkimuksen tausta ja aikaisempia tutkimuksia

Kuvioittaista arviointia on Suomessa käytetty perinteisesti tiedon keruuseen metsiä koskevan päätöksenteon tueksi. Yksityismetsissä kuvioittaisen arvioinnin ja tilakohtaisen suunnittelun tekevät pääosin metsäkeskukset. Alueellinen ja tilakohtainen suunnittelu ovat puolestaan metsäkeskusten lakisääteisiä tehtäviä. Tällä hetkellä metsäsuunnittelu kattaa noin 72 % yksityismetsien pinta-alasta (Metsäsuunnittelun kokonaisselvitys 1997).

Kansallisessa metsäohjelmassa (KMO) tilakohtaisen metsäsuunnittelun tavoitteeksi on asetettu 75 % yksityismetsien pinta-alasta (Maa- ja metsätalousministeriö 1999). Suunnittelun pinta-alaa voidaan nostaa lisäämällä yhteiskunnan tukea sekä suunnittelun ja nykyisten menetelmien tehostamisella.

Kaukokartoitus tarjoaa yhden kustannustehokkaan vaihtoehdon kuviotietojen tuottamiseen. Käytetyimmät satelliittikuvalähteet metsätaloudessa ovat olleet Landsat- ja SPOT-satelliitit. Toistaiseksi näiden heikko spatiaalinen resoluutio (30/15 m) on rajoittanut satelliittien käyttökelpoisuutta kuviotasolla. Uusien satelliittiohjelmien myötä satelliittien resoluutio sekä todennäköisesti myös kuviotason tietojen luotettavuus tulevat paranemaan.

Heikosta resoluutiosta huolimatta satelliittikuvien hyödyntämistä metsätaloudessa on tutkittu viimeisten kymmenien vuosien aikana tiiviisti. Tiedon estimoimiseen on käytetty useita menetelmiä, joista *k*-lähimmän naapurin menetelmä (*k*-nearest neighbour, *knn*) lienee yksi yleisimmistä (mm. Keller ym. 1985). Lähimmän naapurin menetelmässä toisiaan lähellä olevat hahmovektorit kuuluvat samaan luokkaan. Luokiteltavasta hahmovektorista laskeaan etäisyydet kaikkiin tukialueiden vektoreihin ja järjestetään etäisyydet pienimmästä suurimpaan. Näistä tukialueen hahmovektoreista haetaan *k* lähintä ja kohde luokitellaan luokkaan, jota on eniten. Menetelmän yksi variaatio on Kilkin ja Päivisen (1987) esittelemä referenssikoealamenetelmä, jossa spektristä etäisyyttä käytetään tukialuetiedon merkityksen painottamiseen. Kyseistä menetelmää ovat soveltaneet ja edelleen kehittäneet mm. Toko-

la (1990), Tokola ym. (1996) ja Tomppo (1992). Menetelmissä tukiaineistona käytetään yleensä koealoittain tai kuvioittain mitattuja tunnuksia. Satelliittikuvan sävykanavien lisäksi estimoinnissa voidaan käyttää apuna myös muuta tietoa, esimerkiksi tietoa kasvupaikasta tai vanhaa inventointitietoa (Tokola ja Heikkilä 1997, Katila ja Tomppo 2001, Mäkelä 2001, Tuominen ja Poso 2001). *Knn*-menetelmä on operatiivisessa käytössä valtakunnan metsien inventoinnissa (VMI) (Tomppo 1990, Katila ja Tomppo 2001).

Tokola ja Heikkilä (1995, 1997) estimoivat referenssikoealamenetelmällä puuston keskitilavuutta. Inventoitava alue ositettiin numeeristen veroluokituskarttojen avulla. Puuston keskitilavuuden suhteellinen keskivirhe oli 50 hehtaarin alueella 14 %. Tätä pienemmillä alueilla keskivirhe oli selvästi suurempi ollen esimerkiksi yhden hehtaarin kokoisella alueella 39,3 %. Puulajeittaisten tilavuusestimaattien keskivirheet yhden hehtaarin alueella vaihtelivat kuusen 58,6 %:sta männyn 93,5 %:iin. Veroluokituskarttojen käyttö pienensi keskivirhettä alueen koosta riippuen 1–6 %. Holmgrenin ym. (2000) tutkimuksessa keskitilavuuden keskivirhe metsikkökuvioilla oli 36 %, kun käytettiin ainoastaan satelliittikuvan sävykanavia. Metsikkökuvioiden keskikoko oli 19 hehtaaria. Sävykanavien lisänä käytetyt kasvupaikka, ikä ja keskipituus pienensivät keskivirheen 17 %:iin. Mäkelä (2001) estimoi *knn*-menetelmällä puustotunnuksia metsikkökuvioille. Landsat TM -sävykanavien lisäksi hän käytti vanhoja kuvioittaisen arvioinnin tietoja. Keskitilavuuden keskivirheeksi tuli tällöin 29,8 % ja puulajeittaisten keskitilavuuksien 56,8–123,5 %. Ilman vanhaa inventointitietoa puuston keskitilavuuden keskivirheeksi tuli 47,6 % ja puulajeittaisten keskitilavuuksien 81,3–174,4 %. Mäkelä (2001) estimoi puustotunnuksia myös segmenteille. Vanhojen kuviotietojen käyttö pienensi puuston keskitilavuuden keskivirheen 58,0 %:sta 39,5 %:iin.

Suomessa metsäsuunnittelussa erotettava keskimääräinen metsikkökuvion koko on 1–2 hehtaaria. Kuviot ovat monesti epämääräisen muotoisia. Heikon resoluution satelliittikuvilla pikselit osuvat usein kuviorajojen päälle. Estimoinnin tuloksia voidaan parantaa käyttämällä estimoinnissa tietoa metsikkökuvion rajoista. Kilpeläinen ja Tokola (1999) estimoivat puuston keskitilavuutta metsik-

kökuviolle referenssikoealamenetelmällä. Puuston keskitilavuuden keskivirheeksi he saivat 62 %. Kun lisätietona estimoinnissa oli koealan etäisyys kuvion reunasta, keskivirhe pieneni 56 %:iin. Käyttämällä metsikkökuvioiden sijasta segmenttejä, Kilpeläinen ja Tokola (1999) saivat tilavuuden keskivirheeksi 59 %. Mäkelä ja Pekkarinen (2001) estimoivat puuston keskitilavuutta segmentoidulle Landsat TM -kuvulle knn-menetelmällä. Keskitilavuuden keskivirheeksi tuli 79,3 % ja puulajeittaisten tilavuuksien keskivirheeksi 138,1–193,5 %.

Satelliittikuvien käyttöä toimenpide-ehdotusten tuottamiseen on toistaiseksi tutkittu vähän. Sen sijaan alueiden luokittelusta on tehty paljon tutkimuksia. Franco-Lopez ym. (2001) luokittelivat Landsat TM -kuvaa knn-menetelmällä eri luokkiin vallitsevan puulajin mukaan. Kokonaisluokituksen tarkkuudeksi he saivat 52,3 % ja eri luokkien oikeinluokitusprosentti oli 0–88 %. Stefanov ym. (2001) estimoivat alueen maankäyttöluokkia 8–12 eri luokkaan Landsat TM -kuvalta. Kokonaisluokituksen tarkkuus oli 57–85,2 % luokkien määrästä ja menetelmästä riippuen.

## 1.2 Tutkimuksen tavoite

Tämän työn tavoitteena on selvittää, kuinka hyvin Landsat TM -satelliittikuva sopii alue- ja metsikkötason puustotietojen ja toimenpide-ehdotusten estimointiin. Estimoinnissa käytetään satelliittikuvan

lisäksi vanhaa kuvioittaista inventointitietoa. Tarkasteltavina puustotunnuksina ovat keskitilavuus, puulajeittaiset tilavuudet, ikä, pohjapinta-ala sekä keskiläpimitta ja -pituus. Tarkasteltavina toimenpide-ehdotuksina ovat hakkuutapa ja taimikonhoito. Koska tuki- ja kohdealue sijaitsevat noin 45 kilometrin päässä toisistaan, samalla tarkastellaan voiko olemassa olevan suunnittelualueen tietoja käyttäen uuden suunnittelualueen tietojen tuottamiseen.

## 2 Aineisto

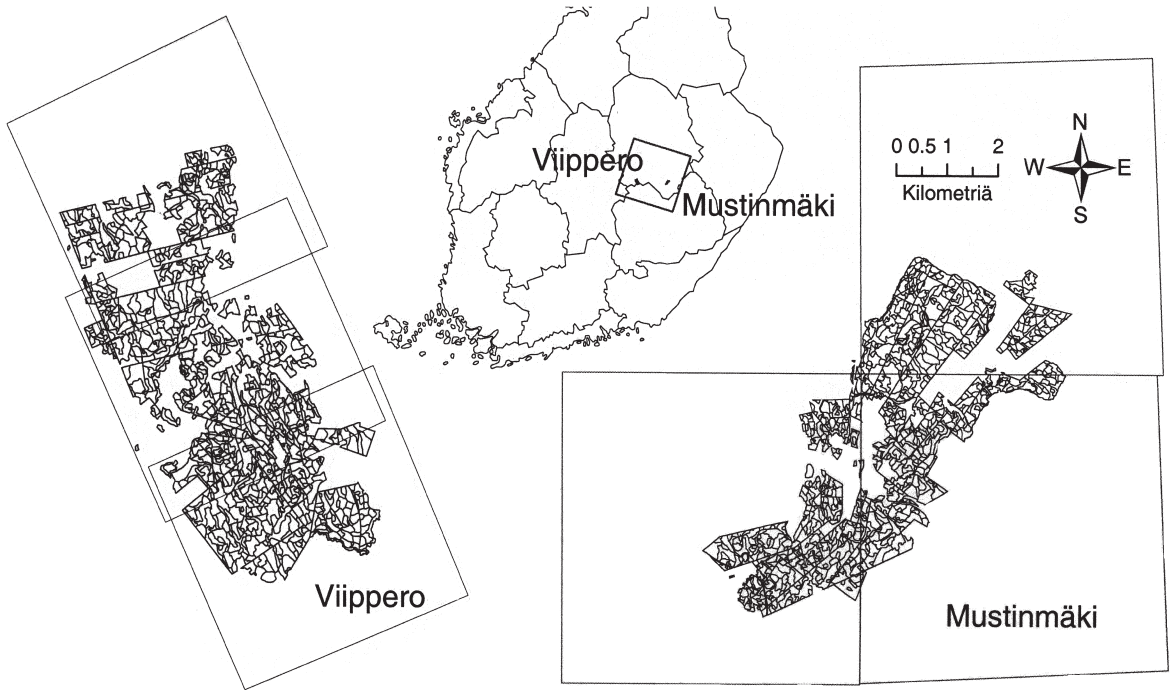
### 2.1 Tutkimuksissa käytetty kuviotieto

Tutkimusalueet sijaitsevat Pohjois-Savon metsäkeskuksen alueella lähellä Suonenjokea (Viipero) ja Leppävirtaa (Mustinmäki) (kuva 1). Molemmilta alueilta oli käytettävissä kuvioittaisen maastoarvioinnin tiedot kahdelta ajankohdalta; Viipperosta vuosilta 1987 sekä 1999 ja Mustinmäestä vuosilta 1990/1991 sekä 2001. Aluetason tarkastelussa tuki-alueena oli Viipero ja kohdealueena Mustinmäki. Tuki- ja kohdealueen tärkeimmät tunnusluvut ovat taulukossa 1. Kohdealueella oli selvästi tukialuetta vanhempia ja kuusivaltaisempia metsiköitä (kuvat 2 ja 3).

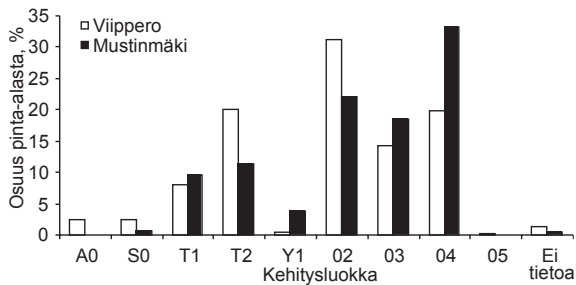
Kuviotiedot oli arvioitu suunnittelijan tekemällä kuvioittaisella arvioinnilla molemmissa inventoinneissa. Kuvioiden rajaukset oli tarkistettu maastossa

**Taulukko 1.** Tuki- (Viipero) ja kohdealueen (Mustinmäki) sekä tarkistusmittausaineiston metsä-, kitu- ja joutomaan kuvioiden tärkeimmät kuvio- ja puustotunnukset.

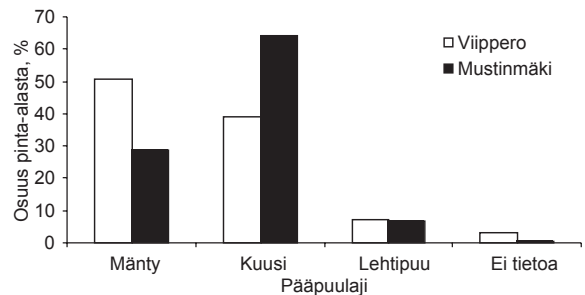
Tunnus	Tuki- ja kohdeaineisto		Tarkistusmittausaineisto	
	Viipero	Mustinmäki	Viipero	Mustinmäki
Kuvioita, kpl	935	921	37	22
Kivennäismaan kuviot, kpl	801	772	37	21
Suokuviot, kpl	134	149	0	1
Kuvion keskikoko, ha	1,8	1,4	3,1	1,9
Ikä, a	43,3	46,3	66,2	55,1
Pohjapinta-ala, m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup>	10,9	15,9	21,3	23,0
Keskiläpimitta, cm	12,2	16,8	24,1	22,3
Keskipituus, m	11,9	13,4	19,8	18,5
Keskitilavuus, m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	88,7	122,7	204,5	203,3
Männyn keskitilavuus, m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	33,5	27,0	77,2	46,4
Kuusen keskitilavuus, m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	43,9	78,7	108,4	136,7
Lehtipuuston keskitilavuus, m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	11,3	17,0	18,9	20,2



**Kuva 1.** Viiperon ja Mustinmäen tutkimusalueiden sijainti. Suomen kartassa metsäkeskusten sekä käytetyn satelliittikuvan rajat. Kohdekartoissa alueiden kuviorajat sekä käytettyjen ilmakuvien rajat.



**Kuva 2.** Viiperon ja Mustinmäen kuvioiden kehitysluokkajakauma.



**Kuva 3.** Viiperon ja Mustinmäen kuvioiden puulajisuhteet.

ja kuviolta oli mitattu silmämääräisesti 4–8 koealaa, joista lasketut keskiarvot kuvasivat metsikön puustotunnuksia puusto-ositteittain. Eri inventointitietokuvien kuvioinnit oli tehty toisistaan riippumatta eikä kaikille uusille kuviolle ollut vanhaa tietoa käytössä. Tutkimukseen valittiin vain kuviot, joille vanhaa tietoa oli saatavilla. Molemmilta alueilta poistettiin kuviot, jotka oli uudistushakattu satelliittikuvan oton ja uuden inventoinnin välissä. Tämä tehtiin vertaamalla visuaalisesti satelliittikuvaa ja uutta

kuviotietoa. Lisäksi poistettiin kuviot, jotka eivät kokonaan mahtuneet samalle ilmakuvulle, koska samaa aineistoa käytettiin myös ilmakuvapohjaisessa tutkimuksessa. Lopulliseksi kuviomääräksi jäi Viiperossa 935 kpl ja Mustinmäessä 921 kpl.

Molemmilla alueilla oli tehty tarkistusmittauksia, Viiperossa 37:llä ja Mustinmäessä 22:lla kuviolla. Tarkistusmitatuille kuviolle oli sijoitettu systemaattisesti keskimäärin kahdeksan kiinteästä ympyräkoelaa, joista oli mitattu puustotiedot.

**Taulukko 2.** Tarkistusmittausaineiston perusteella lasketut uuden kuvioittaisen arvioinnin virheet tuki- (Viippero) ja kohdeaineistossa (Mustinmäki). Tukiaineiston tilastollisesti merkitsevät harhat merkitty \*-illä.

Tunnus	Viippero, 37 kuviota				Mustinmäki, 22 kuviota			
	RMSE	RMSE%	harha	harha%	RMSE	RMSE%	harha	harha%
Ikä, a	9,23	13,94	0,62	0,94	7,61	13,82	-0,06	-0,12
Pohjapinta-ala, m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup>	4,98	23,32	1,88*	8,82	4,20	18,27	0,80	3,49
Keskiläpimitta, cm	5,75	23,89	4,79*	19,88	2,52	11,29	0,45	2,02
Keskipituus, m	2,59	13,11	1,67*	8,44	2,81	15,10	0,80	4,28
Keskitilavuus, m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	57,61	28,18	28,17*	13,78	46,55	22,90	17,05	8,39
Männyn keskitilavuus, m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	36,06	46,72	6,10	7,90	21,91	47,22	-2,23	-4,81
Kuusen keskitilavuus, m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	33,23	30,67	12,70*	11,72	37,76	27,62	16,72	12,23
Lehtipuuston keskitilavuus, m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	14,91	78,75	9,34*	49,48	9,58	47,52	2,61	12,94

Kyseinen aineisto muodosti tarkistusmittausaineiston. Sen avulla voitiin tarkistaa uuden kuviotiedon luotettavuus. Viiperon kuvioaineisto havaittiin Mustinmäen kuvioaineistoa epätarkemmaksi, esimerkiksi tilavuuden suhteellinen keskivirhe oli 28,18 % ja harha 13,78 % (taulukko 2). Tämän vuoksi tukiaineistona käytetyn Viiperon kuvioaineiston puuston pohjapinta-aloja, keskiläpimittoja, tilavuuksia ja puulajeittaisia tilavuuksia kalibroitiin tarkistusmittausaineiston perusteella. Pohjapinta-ala ja keskiläpimitta kalibroitiin erikseen ja tilavuus sekä puulajeittaiset tilavuudet kalibroitiin samanaikaisesti, jotta puulajeittaiset tilavuudet summautuisivat edelleen kokonaistilavuudeksi. Kalibrointi tehtiin suoraviivaisesti pienentämällä tai suurentamalla alkuperäisiä arvoja suhteellisilla kertoimilla muutamassa ositteessa. Esimerkiksi kokonaistilavuuden kalibroinnissa korjauskertoimet laskettiin seuraaville ositteille: 1. pääpuulaji kuusi ja keskitilavuus vähintään 200 m<sup>3</sup>/ha, 2. pääpuulaji kuusi ja keskitilavuus 50–200 m<sup>3</sup>/ha, 3. pääpuulaji mänty ja keskitilavuus yli 50 m<sup>3</sup>/ha, 4. pääpuulaji koivu tai muu lehtipuu.

## 2.2 Kuvamateriaali

Tutkimuksessa käytettiin 30 metrin spatiaalisen resoluution Landsat 7 TM -kuvan 187/16 (rata/keskipiste) vasenta alaneljännestä (kuva 1). Kuva oli otettu 2.8.1999. Kuva oikaistiin 43 tukipisteen avulla yhtenäiskoordinaatistoon 25 metrin resoluutioon ensimmäisen asteen polynomifunktiolla. Tukipisteiden sovituksen kokonaisvirhe oli 0,527 pikseliä, x-suunnassa virhe oli 0,4 pikseliä ja y-suunnassa

virhe oli 0,34 pikseliä. Tutkimusta varten kuvasta leikattiin 64 km × 25 km kokoinen osakuva, joka kattoi molemmat tutkimusalueet. Satelliittikuvalta erotettiin peruskartta-aineiston avulla pois muut kuin metsämaat. Muiden maaluokkien poisto tehtiin laskennan nopeuttamiseksi.

Satelliittikuvasta käytettiin kanavia 1–5 ja 7. Kanavaa 6 ei käytetty sen huonomman spatiaalisen resoluution takia. Koska estimoinnissa käytettiin myös vanhaa kuviotietoa liitettyä lisäkanaviksi satelliittikuvaan, satelliittikuvan kanavat ja lisäkanavat normalisoitiin siten, että kunkin kanavan sävyarvojen keskiarvoksi tuli nolla ja keskihajonaksi yksi. Tämän jälkeen kanavien arvot skaalattiin välille 0–255, jotta jokaisella kanavalla olisi estimoinnissa samansuuruinen painoarvo.

## 3 Menetelmät

### 3.1 Käytettyjen piirteiden haku

Vanhoista kuviotiedoista puuston keski-ikä, keskitilavuus, lehtipuun suhteellinen osuus sekä pohjapinta-alan, keskipituuden, pääpuulajin ja kasvupaikan avulla johdettu harvennuksen ajankohdan läheisyys (Luonnonläheinen metsänhoito 1994) liitettiin satelliittikuvaan lisäkanaviksi. Vanhoja inventointitietoja käytettiin, koska mm. Mäkelä (2001) havaitsi niiden parantavan selvästi puustoestimaatteja. Harvennuksen ajankohdan läheisyydellä oletettiin tarkennettavan hakkuutoimenpiteiden luokittelua. Molemmille alueille vanha tieto liitettiin lisäkanavaksi suoraan vanhojen kuviorajojen mukaan. Vanhaa inventointi-

tietoa voidaan hyödyntää, jos sama tieto on käytettävissä sekä tukiaineistossa että kohdealueella.

Koska kuvioinnit olivat eri inventoinneissa hivenen erilaiset, jouduttiin kohdealueen (Mustinmäki) kuvioille kohdistamaan toimenpide-ehdotusten luokittelussa tarvittavat vanhat puusto- ja kuviotiedot uudestaan. Vektorimuodossa ollut vanha kuviotieto rasteroitiin, minkä jälkeen uudelle kuvioille haettiin tieto siltä vanhalta kuviolta, joka oli vallitsevana uuden kuvion alueella.

Landsat TM -kuvasta metsikkökuvioiden sävyarvopiirteet (Landsat kanavat 1–5 ja 7 sekä neljä lisäkanavaa) haettiin kolmella eri menetelmällä; a) pikselien sävyarvojen keskiarvona metsikkökuvioilla, b) pikselien painotettujen sävyarvojen keskiarvona metsikkökuvioilla ja c) metsikkökuvion ydinosassa pikselien sävyjen keskiarvona. Painotettu sävyarvojen keskiarvo laskettiin painottamalla pikselien sävyarvoja etäisyydellä kuvion reunasta. Mitä etäämpänä pikseli oli kuvion reunasta, sitä suurempi oli sen painoarvo. Ydinosien keskiarvon laskennassa olivat metsikkökuvioilta mukana vain ne pikselit, jotka eivät koskettaneet kuviorajoja. Näistä kuvioista käytetään jatkossa nimitystä ydinkuvio. Ydinkuvioiden määrä oli 558 kappaletta.

### 3.2 knn-menetelmä

Puustotunnusten estimointi tehtiin etäisyydellä painotetulla knn-menetelmällä, missä estimaatit laskettiin k:n aputiedoltaan lähimmän naapurin painotettuna keskiarvona. Painotus tehtiin käyttämällä euklidisen aputiedosta lasketun etäisyyden käänteislukua (kaava 1) (Altman 1992).

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

missä

$\hat{y}$  = estimaatti

$y_i$  = i:n naapurin y arvo

$d_i$  = i:nksi lähimmän naapurin euklidinen aputiedosta laskettu etäisyys kohdekuviosta

k = käytettyjen naapureiden määrä.

Toimenpiteiden luokittelu tehtiin painottamattomalla knn-menetelmällä. Menetelmässä tuotettiin k:n lähimmän naapurin luokkajakauma, josta valittiin

luokkaosuudeltaan suurin toimenpide-ehdotus.

Ennen puustotunnusten estimointia ja toimenpide-ehdotusten luokittelua testattiin eri tavoin haettujen piirteiden paremmuutta sekä lähimpien naapurien lukumäärää tukiaineistossa ristiinvalidoinnin (engl. cross-validation) avulla. Ristiinvalidoinnissa tukiaineiston kullekin kuviolle haettiin estimaatti aineiston muiden kuvioiden avulla. Kriteereinä käytettiin estimaatin keskivirhettä (kaavat 2 ja 3) sekä harhan estimaattia (kaavat 4 ja 5).

Estimoidut puustotunnukset sekä luokittelun toimenpide-ehdotukset olivat suoraan käyttökelpoisia jatkotarkasteluun. Toimenpide-ehdotuksia saattoi luokittelusta tulla useita, maksimissaan luokittelussa käytettyjen naapurien verran. Tämän vuoksi ehdotuksia tarkennettiin vielä luokittelun jälkeen. Tämä tapahtui käyttämällä hyväksi vanhasta inventointitiedosta kuviolle kohdistettuja kuviotietoja (alaryhmä, kasvupaikka), puustotietoja (ikä, tilavuus, runkoluku, pääpuulaji, pohjapinta-ala) ja toimenpide-ehdotuksia (hakkuutapa, taimikonhoito) sekä niiden kiireellisyttä. Näiden avulla pyrittiin valitsemaan loogisin toimenpide-ehdotus. Valinta tehtiin muutamien yksinkertaisten päättelysääntöjen avulla. Esim. luokittelun tuloksena oli saatu toimenpide-ehdotuksiksi avohakkuu, harvennus ja ensiharvennus. Vanhoissa kuviotiedoissa oli metsikön ikä 40 vuotta ja hakkuutapana harvennus 5–10 vuoden sisällä. Tällöin toimenpide-ehdotukseksi valittiin harvennus, mikä oli loogisin vaihtoehto.

Toimenpidetarpeet voisi tuottaa myös estimoitujen puustotietojen avulla. Pelkistä puustotiedoista ei kuitenkaan selviä esim. metsikön ryhmittäisyydestä johtuva harvennustarve. Nämä selviävät ainoastaan maastossa ja siksi toimenpide-ehdotukset tuotettiin luokittelemalla ja käyttämällä maastossa päätettyjä toimenpide-ehdotuksia luokittelun tukiaineistossa.

### 3.3 Estimointiyksiköt

Estimointi tehtiin suoraan kuvioille, koska kuviorajat olivat olemassa. Kokeeksi satelliittikuva myös segmentoitiin ja estimointi tehtiin joidenkin muuttujien kohdalla segmenteille. Segmentointi tehtiin käyttämällä modifioitua suunnattujen puiden algoritmia (Narendra ja Goldberg 1980, Pekkarinen 2002) sekä t-suhteeseen perustuvaa alueiden yhdis-

tämialgoritmia (Hagner 1990, Mäkelä ja Pekkari-  
nen 2001). Segmentoinnissa segmenttien keskikoko  
kohdealueella oli yhdistämialgoritmin jälkeen 1,38  
hehtaaria, mikä oli lähes sama kuin kohdealueen  
kuvioiden keskikoko.

Kuvioiden ollessa estimointiyksikköinä estimoi-  
taville kuvioille laskettiin samat sävyarvopiirteet  
kuin tukiaineistossa. Keskiarvosävyjä käytettäessä  
kuvion pikselien sävyjen keskiarvo yleistettiin  
kuvion jokaiselle pikselille. Kun käytettiin kuvion  
ydinosien sävyjen keskiarvoa, ydinosien keskiarvo  
yleistettiin vastaavasti kuvion jokaiselle pikselille.

Kun estimointiyksikkönä oli segmentti, segmentin  
jokaiselle pikselille yleistettiin kyseisen segmentin  
pikseleiden sävyarvojen keskiarvo. Koska segment-  
tien oletetaan olevan sävyarvoiltaan homogeenisem-  
pia alueita kuin kuvioiden, ydinosien sävyarvojen  
tai painotettujen sävyarvojen keskiarvon käyttöä ei  
katsottu tarpeelliseksi. Tukiaineistossa käytettiin  
kuvion ydinosien sävyarvojen keskiarvoja sekä  
kuvion reunaetäisyydellä painotettuja sävyarvojen  
keskiarvoja.

### 3.4 Tulosten arviointi

Estimoitaessa tunnuksia suoraan metsikkökuvioille  
saatuja estimaatteja verrattiin uuden inventoinnin  
kuviotietoihin. Kun estimointiyksikkönä oli seg-  
mentti, haettiin segmenteiltä tieto uusille kuviolle  
osuneiden segmenttien keskiarvoina. Tässäkin tapauksessa  
estimaatteja verrattiin uuden inventoinnin  
kuviotietoihin. Puustotunnusten estimoinnissa  
tuloksien luotettavuutta tarkasteltiin keskivirheen  
(kaava 2), suhteellisen keskivirheen (kaava 3),  
harhan (kaava 4) ja suhteellisen harhan (kaava 5)  
avulla.

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

$$RMSE_s = \frac{RMSE}{\bar{y}} \times 100 \quad (3)$$

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

$$Harha_s = \frac{Harha}{\bar{y}} \times 100 \quad (5)$$

missä

$\hat{y}_i$  = estimaatti

$\bar{y}$  = havaintojen keskiarvo

$y_i$  = havaittu arvo

$n$  = kuvioiden lukumäärä.

Lisäksi tuloksien luotettavuutta tarkasteltiin kuvion  
pinta-alalla ( $p_i$ ) painottaen (kaavat 6–9).

$$RMSE_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n p_i \times (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n p_i}} \quad (6)$$

$$RMSE_{ps} = \frac{RMSE_p}{\bar{y}} \times 100 \quad (7)$$

$$Harha_p = \frac{\sum_{i=1}^n p_i \times (y_i - \hat{y}_i)}{\sum_{i=1}^n p_i} \quad (8)$$

$$Harha_{ps} = \frac{Harha_p}{\bar{y}} \times 100 \quad (9)$$

Harhan merkitsevyyttä tarkasteltiin toisistaan  
riippuvien otosten parittaisella  $t$ -testillä, jossa tes-  
tisuure saadaan jakamalla erotusten keskiarvo ero-  
tusten keskijajonnalla ja havaintojen lukumäärän  
neliöjuurella (Ranta ym. 1989). Harhan katsottiin  
olevan tilastollisesti merkitsevä, jos testisuureen it-  
seisarvoksi saatiin suurempi kuin 5%:n riskitasolla  
oleva  $t$ -arvo.

Toimenpide-ehdotusten tarkastelu tehtiin oikein-  
luokitusprosentin avulla (kaava 10). Siinä laskettiin  
oikein luokiteltujen osuus jokaisesta luokasta erik-  
seen sekä yli koko aineiston.

$$\text{Oikeinluokitus} - \% = \frac{n_{\text{oikein}}}{n} \times 100 \quad (10)$$

missä  $n_{\text{oikein}}$  on niiden kuvioiden määrä, joilla  
estimointi on tuottanut saman ehdotuksen kuin  
suunnittelija on maastossa antanut.

Koska oikeinluokitusprosentti antaa aina hyviä  
tuloksia, jos jonkin luokan osuus on selvästi mui-

ta suurempi (Cambell 1987), laskettiin vertailun vuoksi Kappa-arvo ( $\kappa$ ) (Rosenfeld ja Fitzpatrick-Lins 1986):

$$\kappa = \frac{N \times \sum_{i=1}^r X_{ii} - \sum_{i=1}^r (X_{i+} \times X_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (X_{i+} \times X_{+i})} \quad (11)$$

missä

$r$  = virhematriisin rivien ja sarakkeiden lukumäärä

$X_{i+}$  = rivisumma rivillä  $i$

$X_{+i}$  = sarakesumma sarakkeella  $i$

$N$  = havaintojen lukumäärä

$X_{ii}$  = havaintojen lukumäärä rivillä  $i$  ja sarakkeella  $i$ .

Lisäksi hakkuuehdotuksia tarkasteltiin yhdistämällä ensiharvennus- ja harvennushakkuu yhdeksi luokaksi ja eri uudistamishakkuut yhdeksi luokaksi. Toimenpide-ehdotusten estimoinnissa tukiaineistossa ei ollut kaistale- eikä verhopuuhakkuuta. Kohdeaineistosta jätettiin tämän vuoksi neljä kuviota pois, joilla oli kyseiset hakkuuehdotukset. Hakkuuehdotusten tarkastelussa oli siten mukana 917 kuviota.

## 4 Tulokset

### 4.1 Sävyarvojen, muun aputiedon ja puustotunnusten korrelaatiot

Puustotietojen ja eri tavoin Landsat TM -satelliittikuvalta haettujen sävyarvojen korrelaatiot

käyttäytyivät lähes samanlaisesti. Korrelaatiot olivat puustotunnusten ja alkuperäisten TM-kanavien välillä negatiivisia ja lisäkanavien välillä sekä negatiivisia että positiivisia. Eroa oli lähinnä korrelaatioiden suuruudessa. Koko tukiaineistossa (935 kuviota) puustotunnusten kanssa vahvimmin korreloivat kanavien neljä ja viisi sävyarvojen keskiarvot. Vahvimmat korrelaatiot olivat kanavan neljä ja puuston iän välillä (−0,605) sekä kanavan viisi ja puuston keskitilavuuden (−0,635) sekä pohjapinta-alan välillä (−0,697). Männyn ja lehtipuuston tilavuudet korreloivat heikoimmin sävyarvojen kanssa. Lisäkanavista ainoastaan lehtipuuston suhteellinen osuus korreloi selvästi lehtipuuston tilavuuden kanssa (0,561) (taulukko 3).

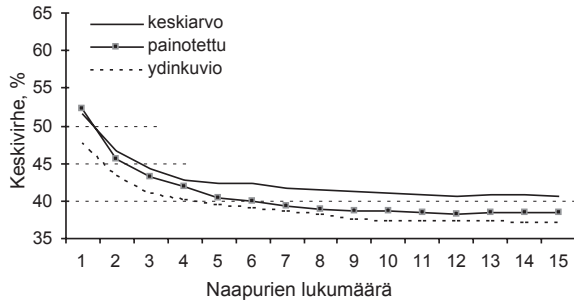
Tarkasteltaessa pelkästään kuvioita, joista voitiin muodostaa ydinkuvio (558 kuviota), olivat korrelaatiot sävyarvojen keskiarvoilla hivenen vahvempia kuin kokoaineistossa. Suurimmat korrelaatiot olivat kanavan neljä ja puuston iän (−0,705) sekä keskiläpimitan (−0,712) välillä sekä kanavan viisi ja puuston keskitilavuuden (−0,700) sekä pohjapinta-alan (−0,772) välillä. Myös lisäkanavilla oli hivenen paremmat korrelaatiot, kuin tarkasteltaessa keskiarvosävyjä koko tukiaineistossa. Tästä poiketen männyn ja lehtipuuston keskitilavuuden korrelaatiot sävyarvojen kanssa olivat koko aineistoa huonommat.

Ydinkuvioille lasketuilla painotettujen sävyarvojen keskiarvoilla oli hivenen sävyarvojen keskiarvoja korkeammat korrelaatiot. Edelleen suurimmat korrelaatiot puustotunnusten kanssa olivat kanavilla

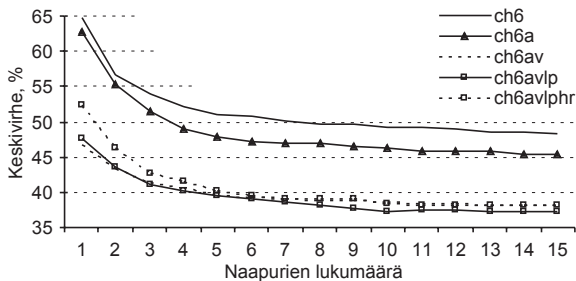
**Taulukko 3.** Landsat TM-kanavien 1–5 ja 7 sekä lisäkanavien sävyarvojen ja puustotunnusten korrelaatiot metsikkökuvioilla (935 kpl). Puustotunnuksen paras korrelaatio lihavoitu.

Kanava	Tilavuus	Tilavuusmänty	Tilavuuskuusi	Puustotunnus		Pohjapinta-ala	Keskiläpimita	Keskipituus
				Tilavuuslehtipuusto	Ikä			
1	−0,450	−0,140	−0,385	−0,213	−0,306	−0,495	−0,382	−0,426
2	−0,587	−0,270	−0,455	−0,237	−0,463	−0,634	−0,539	−0,580
3	−0,451	−0,171	−0,354	−0,249	−0,298	−0,517	−0,381	−0,428
4	−0,568	<b>−0,432</b>	−0,438	0,143	<b>−0,605</b>	−0,550	<b>−0,575</b>	−0,543
5	<b>−0,635</b>	−0,387	<b>−0,485</b>	−0,068	−0,517	<b>−0,697</b>	−0,570	<b>−0,584</b>
7	−0,544	−0,294	−0,416	−0,140	−0,391	−0,622	−0,459	−0,490
Ikä	0,270	0,080	0,316	−0,134	0,441	0,097	0,295	0,235
Tilavuus	0,463	0,148	0,475	−0,041	0,452	0,280	0,417	0,382
Lehtipuu%h- raja	−0,045	−0,181	−0,104	<b>0,561</b>	−0,078	−0,015	−0,004	0,088
	−0,335	−0,273	−0,127	−0,299	−0,222	−0,323	−0,281	−0,325





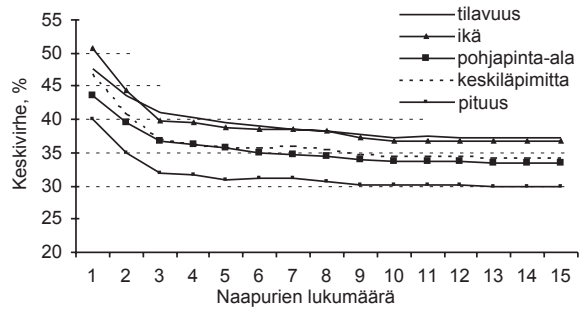
**Kuva 4.** Keskitilavuusestimaatin suhteellinen keskivirhe eri sävyarvoilla ja naapurien lukumäärällä tukiaineiston ristiinvalidoinnissa.



**Kuva 5.** Keskitilavuusestimaatin suhteellinen keskivirhe eri tietoyhdistelmillä ja naapurien lukumäärällä tukiaineiston ristiinvalidoinnissa. ch6 = TM-kuvan sävykanavat 1–5 ja 7, a = vanha puuston ikä, v = vanha puuston keskitilavuus, lp = vanha lehtipuuston suhteellinen osuus, hr = harvennusrajan läheisyys kuviolla.

neljä ja viisi. Männyn ja lehtipuun korrelaatiot olivat muita huonommat.

Ydinkuvioiden tarkastelussa suurimmat korrelaatiot saatiin, kun käytettiin pelkästään kuvion ydinosista laskettuja sävyarvojen keskiarvoja. Tässäkin vahvimmat korrelaatiot olivat kanavan neljä ja puuston keskitilavuuden ( $-0,734$ ), iän ( $-0,743$ ) ja keskiläpimitan ( $-0,764$ ) välillä sekä kanavan viisi ja puuston pohjapinta-alan ( $-0,795$ ) välillä. Myös kanavan neljä ja puuston keskipituuden korrelaatio oli edellisiä menetelmiä selvästi vahvempi ( $-0,745$ ). Männyn ja lehtipuun tilavuuden korrelaatiot sävyarvojen kanssa olivat tässäkin tapauksessa selvästi muita huonommat.

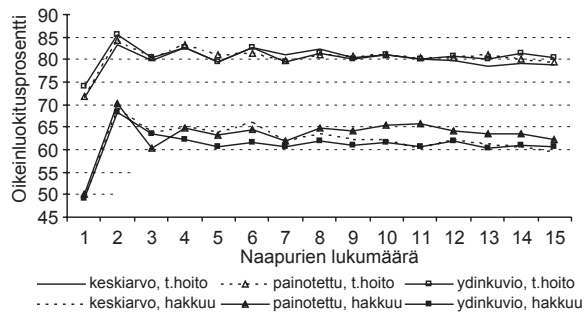


**Kuva 6.** Eri puustotunnusestimaattien suhteelliset keskivirheet tukiaineiston ristiinvalidoinnissa naapurien eri lukumäärillä ydinkuvioilla (558 kpl).

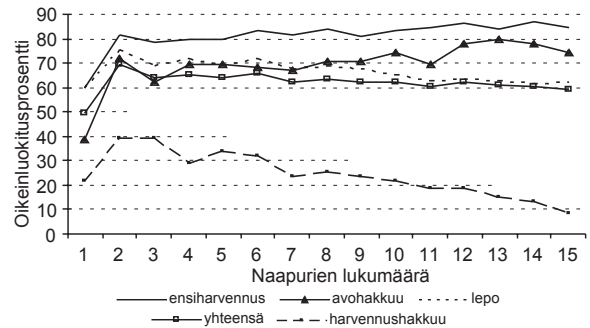
## 4.2 Ristiinvalidointi tukiaineistossa

Puuston keskitilavuuden ristiinvalidoinnissa pienimpiin keskivirheisiin päästiin käyttämällä kuvioiden ydinosista laskettuja kanavien 1–5 ja 7 sävyarvojen sekä kolmen lisäkanavan (vanhan inventoinnin mukainen puuston ikä, keskitilavuus ja lehtipuun osuus) arvojen keskiarvoja (kuvat 4 ja 5). Myös muille puustotunnuksille kyseiset kanavien yhdistelmät tuottivat pienimmät keskivirheet. Käytettyjen naapurien lukumäärän kasvaessa keskivirheet pienenevät alussa selvästi, mutta kymmenen naapurin jälkeen ei juuri ollut muutosta. Puustotunnusten suhteelliset keskivirheet olivat pääosin 30–50 %:n välillä (kuva 6). Puulajeittaisten tilavuuksien suhteelliset keskivirheet olivat suurimmat männyllä, 140–160 %, ja pienimmät kuusella, 80–95 %.

Toimenpide-ehdotusten ristiinvalidoinnissa paras oikeinluokitusprosentti koko aineistossa hakkuuehdotuksissa saatiin käyttämällä kuvion ydinosista laskettuja sävyarvojen keskiarvoja sekä kaikkia neljää lisäkanavaa (kuva 7). Taimikonhoito-ehdotuksissa erot eri sävyarvojen välillä olivat pieniä (kuva 7). Eri hakkuuehdotusten kohdalla oikeinluokitusprosentit vaihtelivat paljon. Parhaiten luokiteltiin osuudeltaan suuret ositteet, ensiharvennus (oikeinluokitusprosentti 21,2 %), avohakkuu (13,3 %) ja lepo (10,9 %). Osuudeltaan pienempien ositteiden luokitustarkkuus huononi käytettyjen naapurien lukumäärän lisääntyessä. Koko aineiston oikeinluokitusprosentti parani käytettyjen naapurien lukumäärän lisääntyessä (kuva 8).



**Kuva 7.** Hakkuu- ja hoitotoimenpide-ehdotusten oikeinluokitusprosentit eri sävyarvoilla tukiaineiston ristiinvalidoinnissa.



**Kuva 8.** Hakkuutoimenpide-ehdotusten oikeinluokitusprosentit ydinkuvion keskiarvosävyillä naapurien eri lukumäärillä tukiaineiston ristiinvalidoinnissa ydinkuvioilla (558 kpl).

**Taulukko 4.** Eri sävyarvoilla sekä alkuperäisellä ja kalibroidulla tukiaineiston tilavuudella kuvioille ja kalibroidulla tukiaineiston tilavuudella segmenteille estimoitujen tilavuuksien keskivirheet ja harhat (\* = harha tilastollisesti merkitsevä,  $k = 7$ ).

Sävyarvot ja kuvio	Koko aineisto, 921 kuviota				Kehitysluokat 02–04, 654 kuviota			
	RMSE		Harha		RMSE		Harha	
	$m^3ha^{-1}$	%	$m^3ha^{-1}$	%	$m^3ha^{-1}$	%	$m^3ha^{-1}$	%
<b>Kalibroimaton tukiaineisto</b>								
Keskiarvo	58,28	47,49	16,48*	13,43	54,18	33,14	20,47*	12,52
Painotettu	57,98	47,25	15,74*	12,83	53,98	33,02	21,38*	13,08
Ydin + keskiarvo	56,70	46,21	13,34*	10,87	52,21	31,94	17,90*	10,95
Ydin + painotettu	56,80	46,29	12,79*	10,42	52,48	32,10	18,89*	11,55
<b>Kalibroitu tukiaineisto</b>								
Keskiarvo	51,62	42,07	-2,20	-1,79	51,29	31,38	3,92	2,40
Painotettu	51,78	42,20	-1,86	-1,52	50,46	30,87	5,06*	3,10
Ydin + keskiarvo	51,86	42,26	-4,48*	-3,65	50,68	31,00	0,97	0,59
Ydin + painotettu	52,27	42,60	-4,11*	-3,35	50,47	30,87	2,20	1,35
<b>Segmentti, kalibroitu tukiaineisto</b>								
Painotettu	76,74	62,54	-7,29*	-5,94	72,76	44,51	15,36*	9,39
Ydin	78,09	63,64	-17,83*	-14,53	69,46	42,49	5,76*	3,52

Edellisten perusteella puustotunnusten estimoinnissa sekä toimenpide-ehdotusten luokittelussa käytettiin kuvioiden ydinosien sävyarvojen keskiarvoja. Puustotunnusten estimoinnissa käytettiin seitsemää lähintä naapuria ja toimenpide-ehdotusten luokittelussa kolmea. Koska pieniltä ja epämääräisen muotoisilta kuvioilta ei välttämättä löytynyt ydinosan pikseliä, jouduttiin kyseisille kuvioille estimoimaan tulokset käyttämällä sävyarvojen tai painotettuja sävyarvojen keskiarvoja.

### 4.3 Kuviokohtaiset estimoinnin tulokset kohdealueella

#### 4.3.1 Puustotunnusten estimaatit

Puuston keskitilavuuden estimoinnissa paras tulos kalibroimattomalla tukiaineistolla saatiin estimoimalla ydinkuvioille puuston keskitilavuus käyttäen tukiaineistossa ydinkuvioille laskettuja sävyarvoja ja lopuille kuvioille (joista ei voitu muodostaa ydinkuviota) laskettuja painotettujen sävyarvojen keskiarvoja (taulukko 4). Suhteelliset

keskivirheet olivat kuvioestimoinnissa kaikilla menetelmillä 46,2–47,5 % ja harhat 10,4–13,4 %.

Kalibroidulla tukiaineistolla tulokset olivat selvästi parempia (taulukko 4). Suhteelliset keskivirheet pienenevät edellisiin vastaaviin menetelmiin verrattuna 3,7–5,4 %-yksikköä ja suhteelliset harhat muuttuivat 1,8–3,7 %:n yliarvioiksi. Eri menetelmien keskivirheet olivat kalibroituja tukiaineistoa käytettäessä lähes samansuuruiset (42,1–42,6 %). Eroa oli lähinnä harhoissa, suhteellinen harhan yliarvio jäi sekä keskiarvo- että painotetuilla sävyarvoilla alle kahden prosentin. Kyseiset harhat eivät olleet tilastollisesti merkitseviä.

Kun estimointiyksikkönä oli segmentti ja tukiaineistona kalibroidut tilavuudet sekä kuvioiden painotettujen sävyarvojen keskiarvot tai ydinkuvioiden sävyarvojen keskiarvot, tulokset olivat selvästi kuvioestimointia huonommat (taulukko 4). Isoille kuvioille segmenttiestimointi tuotti parempia estimaatteja

kuin pienille kuvioille. Pinta-alalla painotetut keskivirheet olivat n. 10 %-yksikköä paremmat kuin painottamattomat keskivirheet. Myös harhat olivat muutaman prosenttiyksikön pienempiä yliarvioita, mutta silti tilastollisesti merkitseviä.

Tarkasteltaessa pelkästään kehitysluokkia 02–04 (nuori kasvatusmetsikkö–uudistuskypä metsikkö), keskivirheet olivat pienempiä kuin koko aineistoa tarkasteltaessa (taulukko 4). Suhteelliset keskivirheet pienenevät 10,7–21,2 %-yksikköä. Sen sijaan suhteelliset harhat olivat sekä kalibroimattomalla että kalibroidulla aineistolla segmentti-estimoinnissa huomattavia, 3,5–13,1 %:n aliarvioita. Kalibroidulla aineistolla kuvioille estimoitaessa harhojen aliarviot olivat 0,6–3,1 %. Harha oli tilastollisesti merkitsevä ainoastaan, kun estimoinnissa käytettiin painotettujen sävyarvojen keskiarvoja.

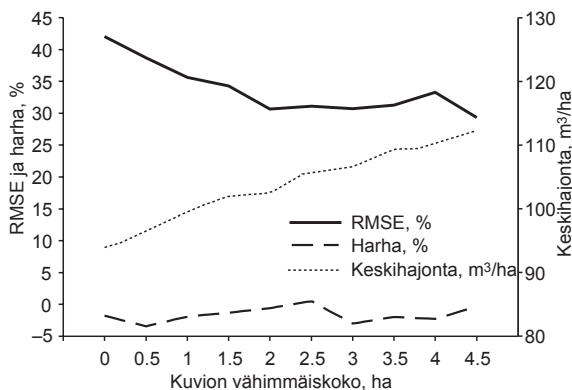
Muiden puustotunnusten osalta eri menetelmillä saadut tulokset noudattelivat keskinäisen

**Taulukko 5.** Alkuperäisillä ja kalibroiduilla tukiaineiston tiedoilla kuvioille ja kalibroiduilla tukiaineiston tiedoilla segmenteille estimoitujen tietojen keskivirheet ja harhat (\* = harha tilastollisesti merkitsevä, k = 7).

Kuvio	Koko aineisto, 921 kuviota				Kehitysluokat 02–04, 654 kuviota			
	RMSE		harha		RMSE		harha	
	abs.	%	abs.	%	abs.	%	abs.	%
<b>Kalibroimaton tukiaineisto</b>								
Ikä, a	20,25	43,68	-1,46*	-3,15	15,54	26,11	2,38*	4,00
Pohjapinta-ala, m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup>	6,53	41,11	2,69*	16,92	6,66	32,62	4,36*	21,37
Keskiläpimitta, cm	7,02	41,81	2,78*	16,54	6,44	30,87	4,46*	21,34
Keskipituus, m	4,55	34,05	0,05	0,38	3,53	21,44	0,67*	4,05
Männyn keskitilavuus, m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	45,44	168,16	-6,82*	-25,25	51,83	148,64	-6,67*	-19,14
Kuusen keskitilavuus, m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	63,24	80,39	17,14*	21,79	71,07	65,20	29,10*	26,70
Havupuuston keskitilavuus, m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	52,26	49,45	8,50*	8,04	53,23	37,00	20,51*	14,26
Lehtipuuston keskitilavuus, m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	21,52	126,46	3,92*	23,06	22,05	112,43	4,66*	23,76
<b>Kalibroitu tukiaineisto</b>								
Pohjapinta-ala, m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup>	5,5	34,64	1,41*	8,90	5,3	26,00	2,22*	10,87
Keskiläpimitta, cm	5,43	32,33	0,09	0,56	4,2	20,1	0,3	1,44
Männyn keskitilavuus, m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	45,63	168,85	-9,85*	-36,47	52,06	149,31	-10,94*	-31,38
Kuusen keskitilavuus, m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	59,71	75,9	7,34*	9,33	67,24	61,68	11,44*	10,50
Havupuuston keskitilavuus, m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	48,64	46,02	-2,83	-2,68	48,96	34,03	-0,05	-0,04
Lehtipuuston keskitilavuus, m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	20,97	123,28	0,63	3,71	21,17	107,92	0,46	2,34
<b>Segmentti, kalibroitu tukiaineisto</b>								
Ikä, a	27,50	59,34	-3,55*	-7,66	23,39	39,29	2,41*	4,05
Pohjapinta-ala, m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup>	7,34	46,21	-0,34	-2,11	6,05	29,65	2,53*	12,42
Keskiläpimitta, cm	8,13	48,39	-0,45	-2,69	6,62	31,72	0,47	2,27
Keskipituus, m	6,11	45,68	-0,78*	-5,80	4,87	29,58	0,10	0,60
Männyn keskitilavuus, m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	45,00	166,51	-6,90*	-25,53	49,94	143,23	-3,06	-8,79
Kuusen keskitilavuus, m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	75,78	96,33	-3,60	-4,57	80,41	73,77	11,10*	-0,18
Havupuuston keskitilavuus, m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	75,24	71,19	-10,50*	-9,93	70,48	48,99	1,59	1,11
Lehtipuuston keskitilavuus, m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	23,04	135,43	2,21*	13,02	24,12	122,96	4,17*	21,25

**Taulukko 6.** Hakkuuehdotusten virhematriisi. Koko aineiston oikeinluokitusprosentti on 45,1 ja kappi-arvo 0,28 ( $k = 3$ ).

Estimaatti	Lepo	Ylispuiden poisto	Ensiharvennus	Maastoehdotus				Yhteensä
				Harvennus	Avohakkuu	Suojuspuuhakkuu	Siemenpuuhakkuu	
Lepo	166	31	33	49	44	9	7	339
Ylispuiden poisto	12	1					1	14
Ensiharvennus	68	18	115	36	2		1	240
Harvennus	31	7	17	34	8	3		100
Avohakkuu	55	5	5	20	97	14	10	206
Suojuspuuhakkuu	2			1	9		1	13
Siemenpuuhakkuu	2				1	1	1	5
Yhteensä	336	62	170	140	161	27	21	917
Oikein, %	49,4	1,6	67,6	24,3	60,2	0,0	4,8	

**Kuva 9.** Kuvion pinta-alan vaikutus keskitilavuusestimaatin suhteelliseen keskivirheeseen ja harhaan sekä keskihajontaan.

paremmuuden osalta tilavuusestimoinnin tuloksia. Taulukossa 5 on eri puustotunnusten estimointien parhaat tulokset kalibroimattomalla ja kalibroidulla tukiaineistolla. Segmenttiestimoinnissa käytettiin kalibroitua tukiaineistoa. Kalibroimattomalla aineistolla parhaat tulokset saatiin pääasiassa käyttämällä kuvion ydinosaan sävyarvojen ja painotettuja sävyarvojen keskiarvoja. Kalibroidulla aineistolla estimoitaessa parhaat tulokset saatiin pääasiassa käyttämällä kuvioiden sävyarvojen keskiarvoja. Erot eri menetelmien välillä olivat pienet. Kalibroittujen tunnusten estimaateista keskiläpimitalla olivat pienimmät virheet. Keskiläpimitan keskivirhe kalibroimattomalla aineistolla vaihteli välillä 41,8–42,3 % ja kalibroidulla aineistolla välillä 32,3–33,8 %. Vastaavasti harhat olivat välillä 16,5–19,0 % ja -0,7...0,9 %. Kalibroimattomien tunnusten estima-

teista keskipituudella oli pienimmät virheet. Keski- virhe vaihteli välillä 34,1–35,2 % ja harha välillä -1,8...0,4 %. Kalibroidulla aineistolla osa harhoista muuttuivat tilastollisesti ei merkitseviksi.

Kuvion koon vaikutus estimaattien keskivirheisiin oli eri tunnuksilla samansuuntainen. Kuvassa 9 on pinta-alan vaikutus puuston keskitilavuusestimaatin keskivirheeseen. Kuvion minimikoon kasvaessa kahteen hehtaariin tunnusten keskivirheet pienenevät lähes lineaarisesti n. 10 %-yksikköä. Tämän jälkeen keskivirheet olivat samalla tasolla tai jopa hivenen suurentuivat. Kun estimointiyksikkönä oli segmentti, keskivirheet pienenevät lähes 20 %-yksikköä kuvion minimikoon kasvaessa nolasta kahteen hehtaariin.

Kohdeaineiston puuston keskitilavuus oli kuvioitaisen arvioinnin mukaan kuvion pinta-alalla painotettuna 135,2 m³ha⁻¹. Estimoinnissa kohdealueen puuston keskitilavuudeksi saatiin 124,4 m³ha⁻¹. Aluetuloksissa puuston keskitilavuuden harha oli siis 8,6 %.

#### 4.3.2 Toimenpide-ehdotusten luokittelu

Hakkuutarpeiden luokittelussa paras tulos saatiin käyttämällä suurilla kuvioilla kuvion ydinosaan sävyarvojen keskiarvoja ja pienillä kuvioilla painotettujen sävyarvojen keskiarvoa sekä päättämällä vanhan tiedon avulla todennäköinen hakkuuehdotus epävarmoissa kohteissa (taulukko 6). Luokittelun jälkeen tehty päättely paransi koko aineiston oikeinluokitusprosentin 43,6 %:sta 45,1 %:iin. Varsinkin ensiharvennus ja siemenpuuhakkuu sekä lepokuvioiden

**Taulukko 7.** Hakkuuehdotusten virhematriisi, kun toimenpideluokkia on yhdistetty. Kasvatushakkuut sisältävät ensiharvennuksen, harvennuksen ja ylispuiden poiston. Uudistamishakkuut sisältävät avo-, suojuospuu- ja siemenpuuhakkuun. Koko aineiston oikeinluokitusprosentti on 57,6 ja kappa-arvo 0,35 ( $k = 3$ ).

Estimaatti	Maastoehdotus			Yhteensä
	Lepo	Kasvatushakkuu	Uudistaminen	
Lepo	166	113	60	339
Kasvatushakkuu	111	228	15	354
Uudistaminen	59	31	134	224
Yhteensä	336	372	209	917
Oikein, %	49,4	61,3	64,1	

kohdistaminen onnistuivat kohdeaineistossa selvästi tukiaineiston ristiinvalidointia huonommin. Eroa oli oikeinluokitusprosentissa jopa 25 %-yksikköä. Kun luokat yhdistettiin kolmeen luokkaan, tulos parani huomattavasti (taulukko 7). Koko aineiston oikeinluokitusprosentti oli tällöin 57,6 %.

Luokiteltujen hakkuutarpeiden pinta-alat olivat lähellä kuvioittaisen arvioinnin tietoja, kun eri hakkuuehdotukset yhdistettiin kolmeen luokkaan. Lepokuvioiden pinta-ala oli arvioinnin mukaan 464 hehtaaria, kasvatushakkuiden 452 hehtaaria ja uudistamishakkuiden 356 hehtaaria. Vastaavat luvut olivat estimoinnin mukaan 432, 458 ja 382 hehtaaria. Eri hakkuutapojen kohdalla pinta-alojen erot olivat suhteellisesti selvästi suuremmat.

Hoitotoimenpiteiden (taimikonhoito ja nuoren metsän kunnostus) luokittelussa paras tulos saatiin käyttämällä kuvioiden sävyarvojen keskiarvoja (taulukko 8). Tällöin koko aineiston oikeinluokitusprosentti oli 70,7 % ja kappa-arvo 0,35. Epävarmojen kohteiden toimenpiteen päättely luokittelun jälkeen paransi luokitusprosenttia vain 0,5 %. Kun taimikonhoito ja nuoren metsän kunnostus yhdistettiin samaan luokkaan, nousi koko aineiston oikeinluokitusprosentti 76 %:iin ja hoitotoimenpiteiden 52,6 %:iin. Koko aineiston kappa-arvo oli tällöin 0,41.

Luokiteltujen hoitotoimenpiteiden pinta-alat jäivät selvästi alle kuvioittaisen arvioinnin tietojen. Taimikonhoidon pinta-ala oli arvioinnin mukaan 244 hehtaaria ja luokituksen mukaan 174 hehtaaria. Vastaavasti nuoren metsän kunnostuskohteita oli arvioinnin mukaan 150 hehtaaria ja luokituksen mukaan 113 hehtaaria.

**Taulukko 8.** Hoitotoimenpiteiden virhematriisi. Koko aineiston oikeinluokitusprosentti on 71,2 ja kappa-arvo 0,36 ( $k = 3$ ).

Estimaatti	Maastoehdotus			Yhteensä
	Lepo	Taimikonhoito	Nuoren metsän kunnostus	
Lepo	548	93	44	685
Taimikonhoito	36	80	28	144
Nuoren metsän kunnostus	48	16	28	92
Yhteensä	632	189	100	921
Oikein, %	86,7	42,3	28,0	

#### 4.4 Puustotunnusten estimaatit tarkistusmittauskuviolla

Koska kuvioittainen arviointi sisälsi arviointivirhetä, tehtiin puustotunnusten tulosten tarkastelu vertaamalla estimoituja tietoja tarkistusmitattujen kuvioiden tietoihin. Viipperon tarkistusmittauskuviolle estimointi tehtiin käyttämällä Viipperon kuvioita, joissa ei ollut tarkistusmittauskuvioita mukana. Mustinmäen tarkistusmittauskuviolle estimointi tehtiin käyttämällä Viipperon kalibroituja aineistoja.

Viipperon tarkistusmittauskuvioiden puustotunnusten estimaatit olivat selviä aliarvioita, ja suhteelliset keskivirheet vaihtelivat tunnuksesta riippuen välillä 14,2–103,7 % (taulukko 9). Myös Mustinmäen estimaatit olivat pääosin aliarvioita ja keskivirheet vaihtelivat välillä 11,8–122,7 % (taulukko 9). Estimaattien keskivirheet olivat hivenen suurempia kuin alueiden kuvioittaisen arvioinnin keskivirheet (taulukko 2). Varsinkin puulajeittaisten tilavuuksien keskivirheet olivat suuria. Mustinmäessä männyn ja kuusen keskitilavuusestimaattien keskivirheet olivat Viipperon vastaavia arvoja selvästi suuremmat. Molemmissa aineistoissa parhaat estimaatit keskivirheen perusteella saatiin puuston iälle, keskipituudelle ja keskiläpimitalle. Molemmilla alueilla männyn ja kuusen keskitilavuuden harhat olivat suuria, mutta tilastollisesti ne eivät olleet merkitseviä

**Taulukko 9.** Tarkistusmittauskuvioille estimoitujen tietojen virheet tuki- (Viippero) ja kohdealueella (Mustinmäki). Tilastollisesti merkitsevä harha on merkitty \*:<sup>llä</sup>.

Tunnus	Viippero, 37 kuviota				Mustinmäki, 22 kuviota			
	RMSE	RMSE%	Harha	Harha%	RMSE	RMSE%	Harha	Harha%
Ikä, a	9,41	14,22	0,81	1,23	11,08	20,11	-2,29	-4,16
Pohjapinta-ala, m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup>	5,47	25,64	3,02*	14,17	6,48	28,18	3,73*	16,24
Keskiläpimitta, cm	6,09	25,28	4,98*	20,67	3,16	14,15	1,00	4,49
Keskipituus, m	3,05	15,37	1,86*	9,37	2,19	11,82	1,36*	7,36
Keskitilavuus, m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	66,23	32,39	38,37*	18,77	62,68	30,84	24,81	12,20
Männyn keskitilavuus, m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	70,76	91,68	16,31	21,13	59,92	122,66	-12,77	-27,51
Kuusen keskitilavuus, m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	63,43	58,54	13,84	12,77	98,28	71,89	35,00	25,60
Havupuuston keskitilavuus, m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	58,21	31,37	30,15*	16,25	62,05	33,88	22,24*	12,14
Lehtipuuston keskitilavuus, m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	19,64	103,71	8,22*	43,43	15,75	78,14	2,57	12,75

## 5 Tarkastelu

Tutkimuksessa tarkasteltiin Landsat TM -satelliittikuvan sekä vanhojen inventointitietojen käyttökelpoisuutta uuden suunnittelualueen kuviotason tietojen tuottamiseksi. Menetelmänä oli ei-parametrinen aputietoon perustuvalla etäisyydellä painotettu *k*-lähimmän naapurin menetelmä (*k*nn-menetelmä) ja estimointi tehtiin sekä kuvioille että segmenteille. Satelliittikuvasta eritavoin irrotettuja sävyarvopiirteitä ja vanhojen kuviotietojen yhdistelmiä testattiin tukiaineistossa ristiinvalidoinnilla. Kohdealueelle estimoinnit tehtiin käyttämällä ristiinvalidoinnissa parhaimmiksi havaittuja yhdistelmiä eli ydinkuvioille kuvion ydinosa laskettuja sävyarvojen keskiarvoja sekä pienille kuvioille laskettuja reunaetäisyydellä painotettuja sävyarvojen keskiarvoja ja satelliittikuvaan liitettyjä vanhoja kuviotietoja. Koska tuki- ja kohdealue sijaitsivat erillään ja olivat ominaisuuksiltaan erilaisia, estimoinnissa käytettiin myös kuvioille laskettuja sävyarvojen keskiarvoja sekä reunaetäisyydellä painotettuja sävyarvojen keskiarvoja. Sovellustilanteessa kohdealueella ei voida vertailla eri menetelmien paremmuutta, vaan paras estimointiketju joudutaan valitsemaan pelkästään tukiaineiston ristiinvalidoinnin perusteella. Sekä ristiinvalidointi että sen perusteella sovellettava estimointimenetelmä ovat automatisoitavissa.

Tukialueella sävyarvojen ja puustotunnusten välillä vallitsi vahva negatiivinen korrelaatio. Varsinkin kanavalla neljä oli voimakkaat korrelaatiot vaihdellen välillä -0,412...-0,764. Parhaimmat korrelaatiot

saatiin käyttämällä kuvion ydinosa laskettuja sävyarvojen keskiarvoja. Seuraavaksi parhaat korrelaatiot olivat kuvion reunaetäisyydellä painotetuilla sävyarvojen keskiarvoilla ja kanavalla neljä niiden arvot vaihtelivat välillä -0,421...-0,775. Kuvion reunoilla olevat pikselit (=reunapikseli) heikensivät selvästi Landsat TM -kanavien sävyarvojen ja puustotunnusten korrelaatiota. Koska pikselin koko on 25 × 25 metriä, saavat reunapikselit sävyarvon useammalta kuviolta, jolloin niiden saama sävyarvo ei vastaa minkään kuvion todellista sävyarvoa. Tämän vuoksi reunapikselien poisjättäminen tai niiden painoarvon pienentäminen paransi selvästi korrelaatioita. Samanlaisia tuloksia saivat mm. Kilpeläinen ja Tokola (1999), Pussinen (1992) ja Mäkelä (2001).

Pelkkien sävykanavien käyttö estimoinnissa ei ristiinvalidoinnin perusteella ollut riittävä. Esimerkiksi tilavuuden keskivirhe pieneni 50%:sta 38%:iin, kun sävykanavien lisäksi käytettiin lisäkanaviksi liitettyjä vanhoja kuviotietoja. Samaan tulokseen tuli mm. Mäkelä (2001), jonka tutkimuksessa tilavuuden keskivirhe pieneni 48%:sta 30%:iin, kun estimoinnissa käytettiin vanhaa kuviotietoa apuna. Vanhojen inventointitietojen käyttö voi aiheuttaa tuloksiin harhaa. Tätä pyrittiin ehkäisemään mm. poistamalla satelliittikuvan oton ja uuden inventoinnin välissä uudishakut kuvat. Aineistoon jäi kuitenkin vanhan inventoinnin ja satelliittikuvan oton välissä uudishakut sekä harvennetut kuvat. Puustotunnusten ristiinvalidoinnissa harhat muuttuivat 0–3 %-yksikköä. Harha muuttui pääsääntöisesti pienestä aliarviosta pieneksi yliarvioksi. Harhan pie-

nuuden takia vanhan inventoinnin tietoja päätettiin käyttää, koska ne pienensivät selvästi tunnuksien keskivirheitä.

Tarkistusmittausaineiston perusteella tukiaineisto havaittiin useiden puustotunnusten osalta harhaiseksi. Tämän vuoksi tukiaineiston puuston keskitilavuutta, puulajeittaisia tilavuuksia, keskiläpimittaa ja pohjapinta-alaa kalibroitiin tarkistusmittausaineiston avulla. Kyseisten tunnusten kohdalla tulokset parantivat selvästi lukuun ottamatta männyn tilavuusestimaattia. Jos mäntyä ja kuusta tarkasteltiin yhteisessä havupuustoluokassa, niin kalibrointi paransi havupuuston tilavuusestimaatin keskivirheen 49,5 %:sta 46 %:iin ja harhan 8,0 %:sta -2,7 %:iin. Tästä voi päätellä, että estimoinnissa männyn ja kuusen erottaminen oli vaikeaa ja ne menivät osittain sekaisin. Tämä johtui todennäköisesti tuki- ja kohdealueen erilaisuudesta. Tukialue oli selvästi mäntyvaltaista ja kohdealue kuusivaltaista. Tukialueen kuvioilla puuston keskitilavuus oli  $34 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$  pienempi kuin kohdealueen kuvioilla. Tämän vuoksi tukialueelta ei löytynyt riittävästi oikeanlaisia kuvioita estimointiin. Tätä päätelmää tukee myös se, että kokeeksi estimointi tehtiin vain tukialueella, jolloin puolet kuvioista muodostivat tukiaineiston ja toinen puoli kohdeaineiston. Kyseisessä estimoinnissa männyn tilavuuden keskivirhe oli 105 % ja harha -14,3 %.

Segmenttiestimoinnissa suhteelliset keskivirheet olivat 10–20 %-yksikköä suurempia kuin kuvioestimoinnissa. Erot eivät välttämättä johtuneet kokonaan estimoinnin epäonnistumisesta, vaan tulosten hakumenetelmästä. Segmenteistä haettiin tieto kuviolle osuneiden segmenttien keskiarvoina. Näin ollen kuviolle saattoi kohdistua lähes saman tietosisällön omaava segmentti ja muutama segmentin reuna-alue, joilla tietosisältö voi olla erilainen ja jotka vaikuttavat keskiarvon laskentaan. Paras tapa hakea tieto kuviolle olisi ollut painottaa segmentin tietoa kuviolle osuneen segmentin pinta-alaosuudella. Tätä ei tehty, koska todennäköisimmässä sovellustilanteessa eli välialuesuunnittelussa ei välttämättä ole kuviorajoja käytössä.

Segmenttiestimoinnin luotettavuuden tarkastelussa käytetty kuviotason aineisto ei välttämättä anna oikeaa kuvaa segmentointimenetelmän käyttökelpoisuudesta. Kuviot pyritään maastossa rajaamaan järkeviksi toimenpideyksiköiksi, jolloin esimerkiksi havupuuvältaisen kuvion sisällä olevat pienet leh-

tipuusaarekkeet yhdistetään ympäröivään kuvioon. Yhdistämisen seurauksena lehtipuuston kuviotunnukset näkyvät koko kuvion keskialueissa tai ne puuttuvat kokonaan. Sen sijaan segmentoinnissa kovalta erottuvat pienetkin homogeeniset alueet muodostavat oman yksikkönsä, jotka ovat perinteisiä metsikkökuvioita selvästi pienempiä. Tämän hankkeen jatkohankkeessa, Metsävaratietojen tuottaminen ja ylläpito (METY II), tutkitaan tarkemmin segmenttien käyttökelpoisuutta puustotiedon tuottamiseksi metsäsuunnittelua varten.

Kehitysluokkien 02–04 estimaattien suhteelliset keskivirheet olivat sekä kuvio- että segmenttiestimoinnissa 10–20 %-yksikköä koko aineiston vastaavia arvoja pienemmät. Suhteellisen keskivirheen pienemiseen vaikuttaa osaltaan tunnuksien keskiarvon nousu. Koska myös absoluuttinen keskivirhe oli kyseisissä luokissa muutaman prosentin pienempi kuin koko aineistossa, estimointi on onnistunut paremmin. Knn-menetelmän ominaisuuksiin kuuluu, että ääripäiden estimaatit ovat heikoimpia ja usein selvästi harhaisia (Altman 1992). Taimikot sekä siemen- ja suojuspuumetsiköt ovat eräänlaisia ääripäitä, joten niiden poisjättäminen paransi tuloksia. Kehitysluokat 02–03 kuuluvat kasvatusvaiheen metsiköihin, joissa latvusto ei ole vielä sulkeutunut ja joissa maasta tuleva säteily on kuitenkin vähäistä. Kyseisissä metsiköissä estimoinnin tuleekin onnistua luotettavimmin, koska säteilyn muutokset heijastavat metsikön ominaisuuksien muutoksia. Sen sijaan aukkoisissa ja harvoissa metsiköissä säteilyyn voi puustoa enemmän vaikuttaa maaperä (Nilson ja Peterson 1994, Holmgren ym. 2000).

Toimenpide-ehdotusten luokittelussa parhaiten onnistuivat taimikonhoidon ja ensiharvennustarpeen luokittelu. Taimikonhoidoista luokituttiin 71,2 % ja ensiharvennuksista 67,6 % oikein. Heikoimmin onnistuivat harvinaisten erikoishakkuiden luokittelu. Niillä luokitusprosentit olivat 0–5 %. Erikoishakkuiden alhaiset oikeinluokitusprosentit johtuivat niiden alhaisista luokkaosuuksista. Useamman naapurin käyttäminen olisi todennäköisesti parantanut kokonaisluokitusprosenttia, mutta huonontanut lisää erikoishakkuuluokitusten tulosta. Samanlaisiin päätelmiin tuli mm. Franco-Lopez (2001). Toimenpiteiden kohdalla tärkeintä on löytää kuviot, joilla on jonkinlaista toimenpidetarvetta. Siksi eri hakkuu- ja hoitotoimenpiteiden yhdistäminen muutamaksi

luokaksi estimoinnin onnistumisen tarkastelussa oli perusteltua.

Metsänhoidollinen toimenpide-ehdotus on jossain määrin subjektiivisesti määritettävä tunnus. Maastoarvioinnissa toimenpidetarpeen arviointitulos riippuu voimakkaasti arvioijasta (Poso 1983). Tätä tukee kohdeaineiston toimenpide-ehdotuksien ja harvennuskalleilla (Luonnonläheinen metsänhoito 1994) laskettujen toimenpide-ehdotuksien vertailun tulos. Kyseisessä vertailussa hakkuiden oikeinluokitusprosentiksi saatiin 56,9 %, kun käytettiin luokkia; lepo, kasvatushakkuu ja uudistushakkuu. Varsinkin kasvatushakkuuehdotuksia oli maastossa annettu selvästi enemmän kuin mitä harvennuskalleilla tuottivat. Tällä perusteella toimenpidetarpeen luokittelun tulosta ei voi pitää kovin huonona.

Tuki- ja kohdealueen uudet sekä vanhat kuviotiedot olivat eri ajankohdilta, mutta satelliittikuva oli samalta ajankohdalta. Kuviotietojen eriaikaisuus lisää estimoinnin virhemahdollisuutta, mitä tässä tutkimuksessa ei tarkasteltu. Satelliittikuvan kaikkien kanavien normalisoinnin tavoitteena oli pienentää kyseistä virhemahdollisuutta. Normalisoinnissa kaikille kanaville tulee sama painoarvo. Ilman sitä lisäkanaviksi liitetyt vanhat kuviotiedot olisivat saaneet sävykanavia suuremman painoarvon, jolloin kuviotietojen eriaikaisuus olisi ollut suurempi ongelma.

Käytetyn Landsat TM -satelliittikuvan tarkkuus ei riittänyt luotettavien kuviotason tietojen tuottamiseen. Vaikka estimaattien virheet tarkistusmittauskuvioilla olivat esimerkiksi puuston keskitilavuuden ja -pituuden osalta lähellä kuvioittaisen arvioinnin virheitä (Poso 1983, Suutarla 1985, Laasasenaho ja Päivinen 1986, Pussinen 1992, Pigg 1994) voidaan etenkin puulajeittaisten tunnusten estimaatteja pitää liian epätarkkoina. Silti satelliittikuva on varteentotettava vaihtoehto tuotettaessa tietoa välialueille, vaikeakulkuisille alueille tai jos halutaan vain karkeita tietoja isommasta suunnittelualueesta. Alueen koolla ei juuri ole vaikutusta estimoinnin kustannuksiin, koska Landsat TM:n 25 × 25 km kuva on lähes samanhintainen 180 × 180 km kuvan kanssa. Alueen koon kasvaessa laskenta-ajat kasvavat, mutta ovat silti vain muutamia päiviä. Oleellista estimoinnin onnistumiseksi on tukiaineiston harhattomuus sekä samankaltaisuus kohdealueen kanssa. Lisäksi käytettävän tukiaineiston tulee olla tarpeeksi kattava

siten, että kuvioita löytyy jokaisesta ositteesta (mm. kehitysluokka, tilavuus, kasvupaikka) tarpeeksi. Myös laskennassa käytettävien tietojen tulisi olla samoilta ajankohdilta.

## Kiitokset

Tutkimus on osa Maa- ja metsätalousministeriön yhteistutkimusvaroin toteutettua metsäsuunnittelun tietohuolto -tutkimushanketta. Pohjois-Savon metsäkeskus on tarjonnut tutkimuksen kuvioaineiston käyttööni, josta kiitokset Juha Hiltuselle ja Pirjo Rissaselle. Kiitokset Jari Varjolle, Helena Mäkelälle, Perttu Anttilalle sekä Kari T. Korhoselle, jotka ovat omalla panoksellaan vaikuttaneet tutkimuksen edistymiseen. Erityiskiitokset Anssi Pekkariselle avustuksesta ohjelmien käytössä ja keskusteluista tutkimuksen ongelmakohdissa.

## Kirjallisuus

- Altman, N. 1992. Introduction to kernel and nearest-neighbour nonparametric regression. *The American Statistician* 46(3): 175–184.
- Campbell, J.B. 1987. Introduction to remote sensing. The Guilford Press, New York. 551 s.
- Franco-Lopez, H., Ek, A. & Bauer, M. 2001. Estimation and mapping of forest stand density, volume and cover type using the k-nearest neighbors method. *Remote Sensing of Environment* 77(3): 251–274.
- Hagner, O. 1990. Computer aided forest stand delineation and inventory based on satellite remote sensing. Teoksessa: SNS/IUFRO workshop in Umeå 26–28.12.1990: The usability of remote sensing for forest inventory and planning. Swedish University of Agriculture Sciences. Remote Sensing Laboratory. Umeå.
- Holmgren, J., Joyce, S., Nilsson, M. & Olsson, H. 2000. Estimating stem volume and basal area in forest compartments by combining satellite image data with field data. *Scandinavian Journal of Forest Research* 15: 103–111.
- Katila, M. & Tomppo, E. 2001. Selecting estimation parameters for the Finnish multisource National Forest Inventory. *Remote Sensing of Environment* 76(1): 16–32.
- Keller, J., Gray, M. & Givens, J.J. 1985. A fuzzy k-nearest



- neighbor algorithm. *IEEE Transactions on systems, Man and Cybernetics* 15(4): 580–585.
- Kilikki, P. & Päivinen, R. 1987. Reference sample plots to combine field measurements and satellite data in forest inventory. *Julkaisussa: Remote sensing-aided forest inventory. Seminars organized by SNS and Taksaattoriklubi, December 10–12, 1986, Hyytiälä, Finland. University of Helsinki, Department of Forest Mensuration and Management, Research Notes 19: 209–215.*
- Kilpeläinen, P. & Tokola, T. 1999. Gain to be achieved from stand delineation in Landsat TM image-based estimates of stand volume. *Forest Ecology and Management* 124(2–3): 105–111.
- Laasasenaho, J. & Päivinen, R. 1986. Kuvioittaisen arvioinnin tarkistamisesta. *Folia Forestalia* 664. 19 s.
- Luonnonläheinen metsänhoito. 1994. *Metsänhoitosuositukset. Metsäkeskus Tapion julkaisuja 6/1994. 2. painos. Helsinki 72 s.*
- Maa- ja metsätalousministeriö. 1999. *Kansallinen metsäohjelma 2010. MMM:n julkaisuja 2/1999.*
- Metsäsuunnittelun kokonaisselvitys. 1997. *Metsäsuunnittelun kokonaisselvityksen projektiryhmä, Tapio. 46 s.*
- Mäkelä, H. 2001. Estimation of forest stand parameters by Landsat TM imagery and stand-level inventory data. *Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta. Metsätalouden suunnittelun lisensiaattitutkimus. 57 s.*
- & Pekkarinen, A. 2001. Estimation of timber volume at the sample plot level by means of image segmentation and Landsat TM imagery. *Remote Sensing of Environment* 77(1): 66–75.
- Narendra, P. & Goldberg, M. 1980. Image segmentation with directed trees. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence Pami-2(2): 185–191.*
- Nilson, T. & Peterson, U. 1994. Age dependence of forest reflectance: analysis of main driving factors. *Remote Sensing of Environment* 48: 319–331.
- Pekkarinen, A. 2002. Image segment-based spectral features in the estimation of timber volume. *Remote Sensing of Environment* 82(2–3): 350–360.
- Pigg, J. 1994. Keskiläpimitan ja puutavaralajijakauman sekä muiden puustotunnusten tarkkuus Metsähallituksen kuvioittaisessa arvioinnissa. *Metsänarvioimistieteen pro gradu -työ. Helsingin yliopisto. 86 s.*
- Poso, S. 1983. Kuvioittaisen arvioimismenetelmän perusteita. *Silva Fennica* 17(4): 313–349.
- Pussinen, A. 1992. Ilmakuvat ja Landsat TM -satelliittikuva välialueiden kuvioittaisessa arvioinnissa. *Syventävien opintojen tutkielma. Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta. 48 s.*
- Ranta, E., Ritala, H. & Kouki, J. 1989. *Biometria – tilastotiedettä ekologeille. Yliopistopaino, Helsinki. 589 s.*
- Rosenfield, G.H. & Fitzpatrick-Lins, K. 1986. A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 52(2): 223–227.
- Stefanov, W., Ramsey, M. & Christensen, P. 2001. Monitoring urban land cover change: An expert system approach to land cover classification of semiarid to arid urban centers. *Remote Sensing of Environment* 77(3): 173–185.
- Suutarla, T. 1985. Kuvioittaisen inventoinnin päivitys ja sen luotettavuus. *Metsänarvioimistieteen pro gradu -tutkielma maatalous- ja metsätieteiden kandidaatin tutkintoa varten. Helsingin yliopisto. 47 s.*
- Tokola, T. 1990. *Satelliittikuvan ja VMI-koealutiedon käyttö metsätalousalueen puuston inventoinnissa. Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta. Lisensiaattitutkimus. 53 s.*
- & Heikkilä, J. 1995. *Satelliittikuvainventoinnin puuston tilavuusestimaattien luotettavuus tilatasolla. Teoksessa: Korhonen, K. & Mäkkeli P. (toim.). Metsien eri käyttömuodot yhdistävä suunnittelu. Metsäntutkimuspäivä Joensuussa 1995. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 568: 23–35.*
- & Heikkilä, J. 1997. Improving satellite based forest inventory by using a priori site quality information. *Silva Fennica* 31(1): 67–78.
- , 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* 17(12): 2333–2351.
- Tomppo, E. 1990. *Satellite image based national forest inventory of Finland. Photogrammetric Journal of Finland* 12(1): 115–120.
- 1992. *Multi-source national forest inventory of Finland. Julkaisussa: Nyssönen, A, Poso, S. & Rautala, J. (toim.). Proceedings of Ilvessalo symposium on national forest inventories. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 444: 52–60.*
- Tuominen, S. & Poso, S. 2001. Improving multi-source forest inventory by weighting auxiliary data sources. *Silva Fennica* 35(2): 203–214.

### 32 viitettä