

METSÄNTUTKIMUSLAITOKSEN TIEDONANTOJA 649, 1997



**Metsävauriutilanteen kartoitus Itä-Lapissa ja
Länsi-Kuolassa maastohavaintojen ja
kaukokartoituksen avulla**

Eero Mattila

JOENSUUN TUTKIMUSASEMA

METSÄVAURIOTILANTEEN KARTOITUS ITÄ-LAPISSA JA
LÄNSI-KUOLASSA MAASTOHAVAINTOJEN JA KAUKO-
KARTOITUKSEN AVULLA

Eero Mattila

Metsäntutkimuslaitos
Joensuun tutkimusasema
1997

Mattila, Eero. 1997. Metsävauriutilanteen kartoitus Itä-Lapissa ja Länsi-Kuolassa maastohavaintojen ja kaukokartoituksen avulla. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 649. 27 s. + värikuvat 4 s. ISBN 951-40-1576-2, ISSN 0358-4283.

1980-luvun loppupuolella ilmeni Lapissa metsätuhoja, joilla epäiltiin olevan yhteyttä Länsi-Kuolan suurten rikkidioksidipäästöjen kanssa. 1989 aloitettiin yhteistutkimus, ns. Itä-Lapin metsävaurioprojekti, jonka yhdessä osatutkimuksessa kartoitettiin metsävaurioiden esiintymistä Itä-Lapissa ja Länsi-Kuolassa. Metsävaurioprojekti päättyi 1995. Tämä julkaisu on em. osatutkimuksen loppuraportti.

Kartoitustutkimuksessa käytettiin satelliittikuvan ohjattua luokitusta ja luokituskuvan maasto-tarkistuksia Itä-Lapissa. Kuva (Landsat TM) oli vuodelta 1990 ja sen suomenpuoleiselta osalta mitattiin kolme riippumatonta maastonäytettä vuosina 1991-1993. Kolmas maastonäyte oli valtakunnan metsien 8. inventoinnista. Montsegorskin alueella tutkimus oli tehtävä suurelta osin ohjaamattomien luokitusten perusteella. Alueen tuhotilannetta arvioitiin vuonna 1985 syntyneeltä kuvalta (Landsat TM) ja tuhotilanteen kehitystä seurattiin vuosina 1978, 1980, 1986 ja 1989 syntyneiltä kuvilta (Landsat MSS). Koko Itä-Lapista ja Länsi-Kuolasta koottiin panoraama neljästä TM-kuvasta, jotka olivat vuosilta 1985, 1987, 1990 ja 1993.

Itä-Lapissa metsätuhojen ja -sairauksien pinta-alat arvioitiin luokitetun otannan periaatteella. Laskennassa käytettiin kuutta kuvaluokkaa, joiden asiiasialtö ml. tuhot arvioitiin valtakunnan metsien inventoinnin maastonäyteestä. Näytti siltä, että kokonaistuhoala oli moninkertaistunut edellisestä inventoinnista (1983-1993). Useat seikat viittasivat siihen, että kehitys ei ole ollut niin huono, joskin tuhojen jonkinasteinen runsastuminen oli ilmeistä. Tuhojen alueellista jakaamaa yritettiin visualisoida esittämällä kaksi tuhorunsainta kuvaluokkaa teemakarttana. Näiden kuvaluokkien tukialueet oli mitattu uudistuskypsissä kuusikoissa ja männikoissä.

Montsegorskin ympärille voitiin satelliittikuvasta rajata useista vyöhykkeistä koostuva 400-500 km² laaja 'metsäkuolema-alue'. Vertailu muiden tietojen kanssa osoitti, että tämä alue piti sisällään paljon myös elävää metsää. Satelliittikuva-aikasarjasta arvioitiin, että kahden pahimman tuholuokan yhteenlaskettu pinta-ala oli lisääntynyt 80 % vuosien 1978-1989 aikana. Arvio tuoreimmalta kuvasta oli 189 km². Murmanskin metsäviraanomaisten mukaan kasvillisuus oli kuollut tai lähes kuollut 140 km² alalta vuonna 1989.

Värillinen panoraamakuva ulottuu etelä-pohjoissuunnassa Kuusamosta Jäämerelle. Kuva 'väritettiin' antamalla TM-kanaville 6 (lämpökanava), 4 (lähi-infra) ja 1 (sininen) värit punainen, vihreä ja sininen. Pahimmat tuhoalueet Montsegorskissa ja Nikelissä erottuivat punasävyisinä niiden muuta ympäristöä korkeamman lämpötilan johdosta. Panoraamaan yhdistetty rikkidioksidin leviämismalli toi selvästi esiin tuhojen ja rikkidioksidin välisen yhteyden Länsi-Kuolassa. Lämpökanavan ansiosta panoraamasta voitiin erottaa myös pahoin kuluneita jäkälälaitumia Suomen ja Norjan koillisrajoilla.

Satelliittikuvatutkimus osoitti, että Itä-Lapin metsätuhoja ja varsinkin niiden yhteyttä Länsi-Kuolan rikkidioksidipäästöihin oli liioiteltu. Satelliittikuvat soveltuivat hyvin varsinaisten metsätuhojen paikantamiseen ja rajaamiseen. Tavanomaisten metsätuhojen ja -sairauksien kartoituksessa satelliittikuvien käyttökelpoisuutta sen sijaan on liioiteltu. Hyöty käytännössä on pieni tai olematon pohjoisen harvoissa ja epätasaisissa metsissä.

Avainsanat: metsien terveys, Itä-Lapin metsävaurioprojekti, satelliittikuvat, maastotarkistus, valtakunnan metsien inventointi

Julkaisija: Metsäntutkimuslaitos, Joensuun tutkimusasema. Hyväksynyt: tutkimusjohtaja Matti Kärkkäinen, 1.8.1997

Kirjoittajan yhteystiedot: Mattila, Eero: Metsäntutkimuslaitos, Joensuun tutkimusasema, PL 68 80101 JOENSUU, puhelin 013-2514030, sähköposti eero.mattila@metla.fi

SISÄLLYS

| | |
|---|----|
| 1 JOHDANTO | 4 |
| 2 SATELLIITTIKUVAKARTOITUKSEN MAHDOLLISUUDET AIKAISEMPIEN TUTKIMUSTEN VALOSSA..... | 6 |
| 3 TAVOITTEET JA MENETELMÄT..... | 7 |
| 4 ITÄ-LAPPI..... | 9 |
| 4.1 Aineistot..... | 9 |
| 4.2 Kuvankäsittely ja luokituskuvan tarkistus | 10 |
| 4.3 Tulosten laskenta | 11 |
| 4.4 Metsätuhojen esiintyminen Itä-Lapissa | 13 |
| 5 MONTSEGORSK..... | 14 |
| 5.1 Tuhotilanne 1985 | 15 |
| 5.2 Tuhotilanteen muuttuminen 1978–1989..... | 16 |
| 5.3 Panoraama Itä-Lapista ja Länsi-Kuolasta..... | 18 |
| 6 YHTEENVETO..... | 19 |
| KIRJALLISUUS..... | 23 |
| KUVALIITE | 27 |

I JOHDANTO

Väestön, liikenteen ja teollisuuden lisääntyessä sekä kaupunkimaisen asumisen yleistyessä ilman laatuun ja metsien terveydentilaan kiinnitetään enemmän huomiota kuin ennen. Huoli metsien terveydestä on aiheellinen suurten asutus- ja teollisuuskeskusten ympäristössä sekä ilmastollisesti äärevissä olosuhteissa. Ilmiöt 'Waldsterben' ja 'forest decline' ovat paikallisia, mutta niiden saama suuri julkisuus on luonut mielikuvia paljon laajemmasta metsien huonokuntoisuudesta.

Ilmansaasteita epäillään yleisesti erilaisten metsätuhojen aiheuttajaksi. Tavallisesti ilmansaasteet vain heikentävät puiden vastustuskykyä ja siten altistavat ne varsinaisille tuhoniheuttajille. Metsien liikatiheys ja yli-ikäisyys myös heikentävät vastustuskykyä. Metsien vajaakäyttöä esiintyy laajoilla alueilla mm. Euroopassa (Kuusela 1994), mikä jatkuessaan enemmän tai myöhemmin lisää metsätuhoja. Liian suurina pitoisuuksina ilman mukana kulkeutuvat saasteet jouduttavat varsinaisten tuhojen puhkeamista. Ilmansaasteista lienee ollut toistaiseksi enemmän hyötyä kuin haittaa niiden lannoittavan vaikutuksen vuoksi. Kasvun parantuminen lisää myös luonnonpoistumaa, mikä osaltaan voi johtaa väärin johtopäätöksiin (Sterba 1995).

Ilmansaasteet eivät tunne rajoja, joten niiden vaikutusten selvittäminen ja seuranta edellyttävät kansainvälistä yhteistyötä. Eurooppaan perustettiin koelaverkko metsien terveydentilan seuraamiseksi 1980-luvun jälkipuoliskolla. Jokainen osallistuva maa mittaa koepuiden harsuuntumisen vuosittain ja tulokset kerätään raporteiksi, joista uusin koskee vuotta 1994 (EC-UN/ECE 1995). Tulokset on pyritty saamaan niin yhteismitallisiksi, että ne mahdollistavat valtioiden välisen vertailun. Ilmansaasteiden osalta Suomi on Euroopan puhtaimpia, mutta harsuuntumisaste on kuitenkin Euroopan keskitasoa. Tämä on osoitus siitä, että muutkin tekijät, kuten ilmasto ja kasvupaikat vaikuttavat puiden harsuuntumiseen. Tämä yritetään ottaa huomioon ns. kriittisiä laskeumia määritettäessä.

Suomen Lappia pidettiin ilmansaasteiden suhteen pitkään lähes taustaksi kelpaavana alueena. Absoluuttiset pitoisuudet ovat kyllä keskimäärin alemmat Lapissa kuin esimerkiksi Etelä-Suomessa (Kauppi ym. 1987). Lapin oma asutus ja teollisuus, voimakkaasti kasvanut liikenne mm. matkailun takia ja kaukolaskeumat ovat muuttaneet käsitystä Lapista mallialueena viime aikoina. Koko Suomeen verrattuna Lapin metsien terveys on keskimääräistä huonompi (Metsäntutkimuslaitoksen... 1995, s. 85). Tämä johtuu toisaalta yli-ikäisten, huonokuntoisten metsien ja toisaalta taimikoiden runsaudesta Lapissa. Ankara ilmasto ja karut kasvupaikat sinänsä altistavat puita tuhoille. Näistä seikoista johtuen kriittinen laskeuma ylittyy Lapissa jo suhteellisen alhaisilla saaste-pitoisuuksilla.

Pohjois-Suomen sääolot olivat poikkeukselliset talvella 1986–87 (Ritari 1990). Seuraavana kesänä löytyi runsaasti pienialaisia paanejäätuhoja ja männyllä tapahtui äkillinen neulaskato (Jalkanen 1990, Penttilä 1990, Tikkanen ja Raitio 1990). Kokeellisesti voitiin myöhemmin osoittaa, että ainakin karuilla kangasmailla männyn neulaskato johtui edellisen talven säistä (Jalkanen ym. 1990, Tikkanen ja Raitio 1990/91). Suurempaa epätietoisuutta aiheutti versosurmaepidemia Itä-Lapissa 1980-luvun lopulla (Jalkanen ja Kaitera 1992).

Sen saama suuri julkisuus johtui toisaalta edellä mainituista metsätuhoista ja toisaalta epidemia-alueen maantieteellisestä sijainnista suhteellisen lähellä Kuolan suuria metallurgian laitoksia. Tiedossa oli, että näissä laitoksissa oli alettu 1970-luvun alussa käyttää erityisen runsasrikkistä nikkelimalmia (Lapin... 1992). Vuonna 1990 Lapin läänin rikki päästöt rikkidioksidiksi laskettuna olivat vajaa 10 000 tonnia. Vastaava arvio Murmanskin alueelta oli 600 000 tonnia.

Lapin metsätuhot ja niiden epäilty yhteys ilmansaasteisiin myötävaikuttivat Kuolan saastepäästöjen vaikutusta Lapin metsiin selvitellessä Itä-Lapin metsävaurioprojektin perustamiseen vuonna 1989. Projekti koostui 15 osaprojektista, joiden alla saattoi olla erillisiä osatutkimuksia. Asiaa valaisee tarkemmin Kauhasen ja Varmolan (1992) toimittama tutkimusprojektin väliraportti sekä Tikkasen (1995) toimittama loppuraportti. Yhden osaprojektin tavoitteena oli Itä-Lapin ja Kuolan metsävaurioiden kartoittaminen satelliittikuvien avulla. Kartoitustutkimus jakautui pian kahteen osaan, jotka erosivat toisistaan sekä alueen että menetelmän puolesta.

Tämä artikkeli on Itä-Lapin metsävaurioprojektin osatutkimuksen 'Satelliittikuvien käyttö Itä-Lapin ja Kuolan metsävauriokartoituksessa' loppuraportti. Loppuraportin laatimista edellytti apuraha, jota osaprojekti sai maa- ja metsätalousministeriön yhteistutkimusrahasta vuosina 1990–95. Metsävaurioprojekti kesti kuusi vuotta. Satelliittikuvatutkimuksen kulkua, menetelmiä ja tuloksia on esitelty eri foorumeilla useissa artikkeleissa, joista neljä tai viisi riittää hyvin kattamaan olennaisen asian ilman mainittavaa päällekkäisyyttä. Ulkopuolisen henkilön voi olla vaikeata ellei mahdollonta saada oikeaa kokonaiskuvaa tehdystä tutkimuksesta ilman kokoavaa review-artikkelia, joksi tämä kirjoitus on tarkoitettu.

Satelliittikuvatutkimuksen kaksi pääraporttia (Mattila 1995, Mikkola 1996) ovat englanninkielisiä. Tämä artikkeli on suunnattu suomenkieliselle lukijakunnalle tarkoituksena paitsi tutkimuksen esittely myös satelliittikuva-tekniikoiden ja niihin liittyvän terminologian tunnetuksi tekeminen. Tähän on tarvetta, koska satelliittikuvien käyttö metsäntutkimuksessa on suhteellisen uutta ja alalla syntyy uusia tekniikoita koko ajan lisää. Lisäksi pääosa alan kirjallisuudesta on englanninkielistä ja sisältää paljon erikoissanastoa.

Artikkeli on laadittu Metsäntutkimuslaitoksen Rovaniemen tutkimusasemalla vuoden 1996 alussa. Allekirjoittanut suunnitteli artikkelin rakenteen ja kirjoitti tekstit. Kari Mikkola ja Juhani Kumpuniemi laativat kuvat ja taulukot. Kuvaliitteen värilliset taulut on tehty Kari Mikkolan luomista digitaalisista kuvatiedostoista. Käsikirjoituksen lukivat Kari Mikkola ja Eero Tikkanen ja heidän korjaus- ja parannusesityksensä on otettu huomioon. Eija Virtanen ja Sirkka Tapaninen kirjoittivat artikkelin puhtaaksi. Kiitän kaikkia tutkimukseen osallistuneita henkilöitä.

Rovaniemi 14.3.1996, Eero Mattila

Tutkimusjohtaja, prof. Matti Kärkkäisen aloitteesta loppuraportti päätettiin julkaista Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja -sarjassa. Julkaisun viimeisteli Erja Kauppinen, jolle esitän tässä kiitokseni.

Joensuu 25.8.1997,
Eero Mattila

2 SATELLIITTIKUVAKARTOITUKSEN MAHDOLLISUUDET AIKAISEMPIEN TUTKIMUSTEN VALOSSA

Metsätuhoja kartoitettiin vaihtelevalla menestyksellä jo 1970-luvun alku-puoliskolla Landsat MSS-materiaalin avulla (ks. Gimbarzevsky 1984). Tätä materiaalia käytetään vieläkin hyväksi pitkittäistutkimuksissa. Toisen sukupolven luonnonvarasatelliittien kausi alkoi 1980-luvun puolivälissä. Suurempi erotuskyky sekä laajempi ja tarkempi spektrinen informaatio antoivat aihetta odottaa parempia tuloksia myös metsätuhotutkimuksissa. Mattila (1995) esittelee 22 tuhotutkimusta eri puolilta maailmaa, joissa käytettiin hyväksi uutta satelliittikuvamateriaalia (Landsat TM ja/tai SPOT). Nämä tutkimukset, joissa kartoitetaan tavanomaisia metsäsairauksia, on tehty borealisissa ja lauhkeassa metsäkasvillisuusvyöhykkeessä. Katsaus vaikutti Itä-Lapin satelliittikuvatutkimuksen menetelmäratkaisuihin. Seuraavassa esitetään joitakin havaintoja ja päätelmiä.

Metsätuhojen kartoituskokeissa kohteina on ollut tasaisia sulkeutuneita metsiköitä. Satelliittikuvamateriaali on ollut hyvälaatuista ja sille on usein tehty radiometrisiä korjauksia ilmakehän ja topografian vaikutuksen vähentämiseksi. Luokituksissa on usein tukeuduttu lisätietoihin kasvupaikasta, topografiasta ja puuston rakenteesta. Näillä edellytyksillä on voitu kartoittaa yleensä vain 2–4 luokkaa riittävällä tarkkuudella. Tätäkään menestystä ei voida odottaa käytännön kartoitustehtävissä. Käytännössä kohteet ovat laajoja ja epätasaisia, tehtävän kannalta optimaalista kuvamateriaalia saadaan harvoin, edellytykset radiometrisille korjauksille ovat huonot ja aputiedot kohteista ovat puutteellisia. Käytännön ja koeolosuhteiden välistä eroa ei ole tiedostettu riittävästi, mikä on johtanut pettymyksiin satelliittikuvien käytössä.

Avohakkuiden ja varsinaisten metsätuhojen kartoitukseen satelliittikuvat kyllä sopivat hyvin. Avohakkuiden kartoitustutkimusta on tehty erityisesti Kanadassa (esim. Hall ym. 1989, 1991). Häme (1991) vertaili muutosten erottumista ja sai parhaiten esiin avohakkuun. Harvennushakkuu erottuu paljon huonommin ja se onnistuu lähinnä vain koeolosuhteissa (Häme 1991, Olsson 1994). Hakkuut ovat osa normaalia metsätaloutta ja esim. Suomessa avohakkuualat on metsitettävä pian hakkuun jälkeen. Varsinaisia metsä- ja ympäristötuhoja ovat kartoittaneet satelliittikuvilta mm. Allum ja Dreisinger (1987), Gillis ym. (1990), Kunz ja Zimmermann (1993), Meer Mohr ym. (1992), Chatterjee ym. (1994), Rathore ja Wright (1993), Tömmervik ym. (1992) sekä Mikkola ja Ritari (1992). Kaksi viimeksi mainittua tutkimusta käsittelevät Kuolan metallisulattojen aiheuttamia ympäristövaurioita.

Euroopassa on pitkät perinteet metsänkartoituksessa ja tiedon laadulle asetetaan korkeat vaatimukset. Tästä syystä suhtautuminen satelliittikuvainformaatioon on ollut skeptinen ja odottava (ks. Kenneweg ym. 1989). Myös tehtävän alueellinen laajuus vaikuttaa menetelmäratkaisuihin. Esimerkiksi Rock ym. (1993) erottavat kolme tasoa kaukokartoitustehtävissä. Tuhokartoituskokeet ovat paikallisia, mutta käytännön kartoitustarve on yleensä alueellinen. Tavoitteet, mukaan lukien tiedon laatu, ratkaisevat menetelmän valinnassa paikallisissa ja alueellisissa kartoituksissa. Hyvin suurialaisissa tehtävissä, kuten maapallon kasvillisuuden seurannassa, satelliittikuvien käyttö on ainoa vaihtoehto ja laatutavoitteet määräytyvät menetelmän mukaisesti.

Suomen Itä-Lappi ja Kuolan alue Venäjällä kuuluvat pääosin pohjois-boreaaliseseen havumetsävyöhykkeeseen. Tunturikoivikoita lukuun ottamatta puustoiset alueet ovat yleensä havupuuvaltaisia. Metsiköt ovat luonnostaan harvoja ja epätasaisia. Ylhäältä katsottuna metsiköistä nähdään lähes aina latvuston lisäksi myös aluskasvillisuutta ja varjoja, joita on keskimääräistä enemmän alueen pohjoisuuden vuoksi. Aluskasvillisuus ja varjot tekevät metsien luokituksen ja varsinkin tavanomaisten metsätuhojen kartoituksen vaikeaksi satelliittikuvainformaation avulla (Koch ym. 1990). Tilannetta pahentaa vielä se, että käyttökelpoisia satelliittikuvia saadaan harvoin pilvisyyden ja lyhyen kesän vuoksi. Näistä tekijöistä johtuen tavanomaisten metsätuhojen suora kartoitus satelliittikuvasta ei ollut mahdollista tutkimusalueella (Mattila 1992). Tätä johtopäätöstä tuki myös tieto parhaan saatavilla olevan satelliittikuvamateriaalin laadun heikentymisestä (Olsson 1994).

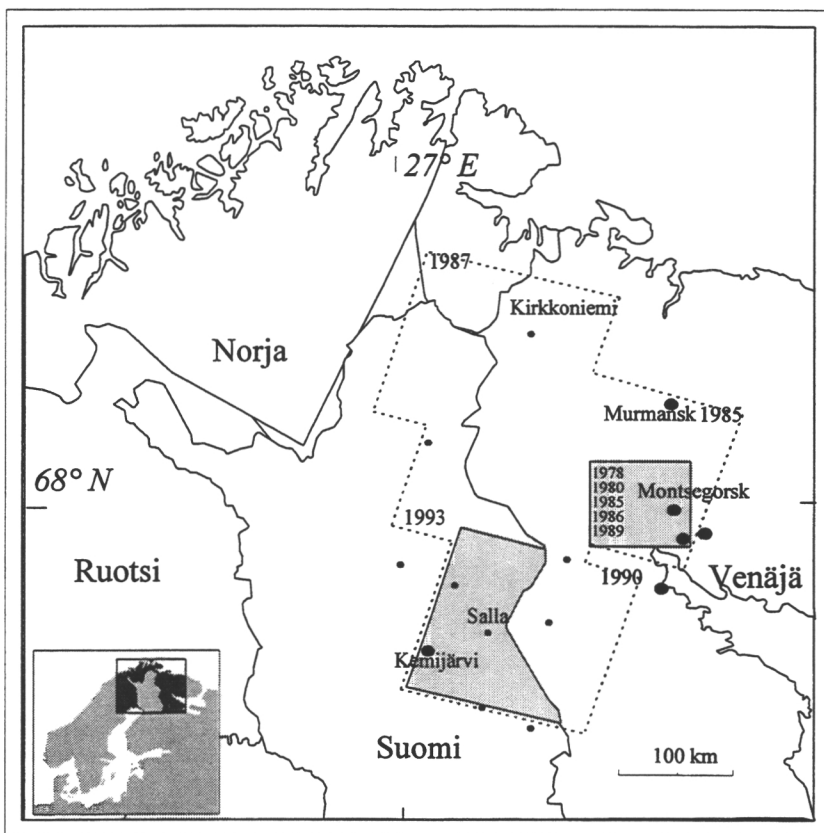
3 TAVOITTEET JA MENETELMÄT

Itä-Lappi ja Kuola eroavat selvästi toisistaan metsätuhojen esiintymisen ja kartoitusmahdollisuuksien osalta. Kuolan metallisulattojen ympäristössä on selviä tuhoalueita, jotka erottuvat hyvin satelliittikuvalla. Itä-Lapissa ei sellaisia tuhoja esiinny. Toisin kuin Itä-Lapissa, Kuolasta ei ollut vaurioprojektin aikana mahdollista hankkia edustavaa maastonäytettä. Nämä seikat yhdessä myötävaikuttivat tutkimuksen jakamiseen kahteen osaan. Toinen osatutkimus tehtiin Koillis-Suomen kuntien alueella ja toinen pääosin Montsegorskin ympäristössä (kuva 1). Alueiden rajausta perustuu satelliittikuvien sijaintiin. Alueet eivät kata Itä-Lappia ja Kuolaa kokonaan. Niissä kuitenkin esiintyvät samat tyypilliset piirteet ja ongelmat kuin koko alueella. Seuraavassa menetelmistä kerrotaan vain yleispiirteet. Menetelmät kuvataan tarkemmin osatutkimuksia käsittelevissä luvuissa 4 ja 5.

Itä-Lapissa tutkimuksen tavoitteeksi asetettiin metsien terveydentilan selvittäminen satelliittikuvan ja systemaattisten maastonäytteiden avulla. Siellä käytettiin luokitettua otantaa, missä luokkien pinta-alat lasketaan satelliittikuvasta ja tuhojen esiintyminen luokissa arvioidaan maastonäytteestä. Kuva luokitettiin ohjattua luokitusmenetelmää käyttäen. Tavanomaiset metsätuhot eivät erotu satelliittikuvasta, joten kuvaluokkien määrittelyssä ei käytetty tuhomuuttujia. Arviointiprosessin eri vaiheissa oli monia menettelyvaihtoehtoja, joita vertailtiin keskenään. Tutkimuksen etenemistapa oli luonteeltaan heuristinen. Lopullisina tuloksina saatiin erilaisten metsätuhojen pinta-alat jaettuna kahteen vaikeusasteeseen sekä kokonaistuhoalan arvion keskivirhe. Arviot kohdistuvat vuoteen 1993. Kokonaistuhoalan arviota voitiin verrata kymmenen vuoden takaiseen tulokseen.

Montsegorskin alueella tavoitteiksi asetettiin tuhotilanteen ja sen muutoksien kartoitus satelliittikuvien avulla. Alueelta ei ollut riittävää maastonäytettä, joten kuvaluokitukset oli tehtävä ohjaamatonta luokitusta käyttäen. Kuvien tulkinta perustui pääasiassa päättelyyn. Päättelyn tukena käytettiin topografia- ja tuulitietoja sekä Tuovisen ym. (1993) kehittämää Kuolasta peräisin olevan rikkidioksidin leviämismallia. Tulkintaa tarkastettiin joillakin subjektiivisesti valituilla maastokohteilla. Menettely ei mahdollista

tulosten tilastollisen tarkkuuden arviointia. Tuhotilannetta 1980-luvun puolivälissä arvioitiin viiden muunnoskanavakuvan ja yhden luokituskuvan avulla. Tuhotilanteen kehitystä 1978–1989 selvitettiin vertaamalla neljää eriaikaista satelliittikuvaa, joista kaikista tehtiin luokituskuva ja kasvillisuusindeksikuva. Koko Itä-Lapin ja Länsi-Kuolan alueesta koottiin myös panoraama neljästä satelliittikuvasta. Metsätuhojen ja rikkipäästöjen välistä yhteyttä tarkasteltiin panoraamaan sovitetun SO₂-mallin avulla.



Kuva 1. Tutkimusalueiden (Itä-Lappi ja Montsegorsk) sijainti. Katkoviivalla rajatulta alueelta on koottu panoraama neljästä satelliittikuvasta. Kuvan vuosiluvut ovat satelliittikuvien syntyvuosia.

4 ITÄ-LAPPI

Itä-Lapissa tehtyä tutkimusta on tarkasteltu kahdessa artikkelissa. Niistä ensimmäisessä (Mattila 1992) käsitellään kuvakartoituksen edellytyksiä Itä-Lapissa ja Kuolassa. Siinä asetetaan lopulliset tavoitteet ja vahvistetaan jako kahteen osatutkimukseen. Toisessa artikkelissa (Mattila 1995) kuvataan Itä-Lapin tutkimus kokonaisuudessaan ja esitetään arvio vuoden 1993 tuhotilanteesta. Tämä pääluku on tiivistelmä Itä-Lapin metsätuhokartoituksesta.

4.1 Aineistot

Tutkimusalueella syntyy vähäpilvinen kesäsateelliittikuva samalta paikalta keskimäärin 2–3 vuoden välein. Kun sellainen kuva syntyy, sen ajoitus kasvukaudella on harvoin optimaalinen käyttötarkoituksen kannalta. Kuvassa 1 näkyvä Itä-Lapin satelliittikuva vuodelta 1990 on Suomen alueella pilvetön. Kuva on Landsat 5 -satelliitin radalta 189 ruudusta 13. Syntypäivä on 31.8, mikä on selvästi optimiaikaa (heinäkuu) myöhemmin. Kuva kuitenkin valittiin tutkimukseen, koska muu materiaali oli liian pilvistä ja/tai vanhaa. Aikaa myöten ilmeni, että vuoden tai kahden odotus ei olisi parantanut tilannetta.

Satelliitin TM-sensori rekisteröi heijastunutta säteilyenergiaa kuudella kanavalla eli aallonpituusalueella, joista kolme on näkyvän valon alueella ja kolme infrapuna-alueella. Lisäksi TM-sensori rekisteröi emittoitunutta pitkäaaltoista lämpösäteilyä lämpökanavalla. Sensorin spektrisiä ominaisuuksia ovat kuvanneet mm. Markham ja Barker (1985) artikkelissaan. Maastoerotuskyky on 120 m lämpökanavalla ja 30 m muilla kanavilla. Tutkimuksessa käytettiin kaikkia seitsemää kanavaa. Lämpökanavan kuva-alkiot jaettiin kuuteentoista osaan muiden kanavien erotuskyvyn jäljittelemiseksi. Koko kuva oikaistiin yhtenäiskoordinaatistoon Suomen alueella sijaitsevien tukipisteiden avulla.

Syksyllä 1991 Itä-Lapista mitattiin systemaattinen maastonäyte satelliittikuvan ohjattua luokitusta varten. Näytteen 224 relaskooppikoealaa sijoitettiin maastossa samoille paikoille kuin vuonna 1983 mitatut valtakunnan metsien inventoinnin koealat muutosanalyysin tehostamiseksi. Lähes kaikki vanhat koealakeskipisteet voitiin vielä paikallistaa maastossa. Syksyllä 1992 mitattiin samankokoinen näyte kuvaluokituksen tarkistamista varten. Sekin oli pääosin systemaattinen ja kiinnitettiin vanhaan inventointinäytteeseen. Kuvaluokituksen ja sen tarkistuksen lisäksi uudet näytteet palvelivat kahta muuta tarkoitusta. Edustavalla maastohavaintoverkolla voitiin osoittaa virheellisiksi väitteet Itä-Lapin metsien terveydentilan dramaattisesta huonontumisesta. Vanhat koealatieidot tukivat johtopäätöksiä. Eri ajankohtien luokituksia verrattiin myös soveltamiserojen paljastamiseksi. Niitä löytyi, mikä otettiin huomioon mm. tukialueita muodostettaessa.

Itä-Lapissa mitattiin valtakunnan metsien 8. inventoinnin maastonäyte kesällä 1993. Näytteen rakenne sekä luokitukset ja mittaukset on selostettu maastotyön ohjeissa (Valtakunnan... 1993). Näyte on kokonaan systemaattinen. Satelliittikuvalla on 2700 relaskooppikoealaa, joten siitä voidaan laskea jokseenkin luotettavia tuhoarvioita ilman satelliittikuvaakin. Näitä arvioita käytettiin ensivaiheessa satelliittikuvatutkimuksen tulosten kontrollointiin.

Havainnot ja johtopäätökset johtivat siihen, että lopulliset tuhoarviot laskettiin luokitetun satelliittikuvan ja inventoinnin näytteen perusteella.

4.2 Kuvankäsittely ja luokituskuvan tarkistus

Itä-Lapin satelliittikuvaa tarkasteltiin ensin visuaalisesti käyttäen alkuperäisiä kanavia ja niiden muunnoksia eli ns. synteettisiä kanavia. Muunnoksilla, joissa yhdistetään kahden tai useamman kanavan informaatio, voidaan pelkistää joitakin kuvaan sisältyviä ominaisuuksia. Pääkomponenttimuunnosta (Hotelling 1933) käyttäen pääosa kuvan informaatiosta voidaan tiivistää kahteen (MSS) tai kolmeen (TM) muunnoskanavaan. Kun Itä-Lapin satelliittikuvalle tehtiin pääkomponenttianalyysi käyttäen kaikkia alkuperäisiä kanavia, kolmas pääkomponentti määräytyi melko pitkälle lämpökanavan perusteella. Kuvalle tehtiin myös TC-muunnos (TC = Tasseled Cap, ks. Kauth ja Thomas 1976, Crist ja Cicone 1984) ilman lämpökanavaa. Toisin kuin pääkomponenttimuunnoksessa, TC-muunnoksessa käytetään vakiokertoimia, eli se ei ole kuva-kohtainen.

Itä-Lapin kuvasta laskettiin myös kolme kasvillisuusindekseihin perustuvaa muunnosta, jotka on tarkemmin kuvattu ja perusteltu Mattilan (1995) artikkelissa. Muunnokset perustuvat NDVI- ja II-indekseihin (NDVI = Normalized Difference Vegetation Index, II = Infrared Index). Indeksejä on kuvailut esim. Cohen (1991) artikkelinsa johdannossa. Muunnoksista koottiin 7-kanavainen työkuva, jossa kanavina olivat kolme ensimmäistä pääkomponenttia, kolmas TC-komponentti ja kolme indeksimuunnosta. Arvot kaikilla kanavilla skaalattiin välille 0–255. Tutkimuksessa käytettiin tätä työkuva. Sen todettiin antavan yhtä hyviä tai hieman parempia tuloksia kuin käytettäessä alkuperäisiä kanavia.

Luokitusta ja sen tarkistusta varten mitattujen koealojen sijainti maastossa oli merkitty ilmakuville. Koealojen koordinaatit satelliittikuvalla määritettiin vertaamalla ilmakuvia ja näytöllä olevaa satelliittikuvaa keskenään. Näin luotiin digitaaliset sijaintiedostot, jotka nopeuttivat kuvankäsittelyä (luokitus + tarkistus) ja siten mahdollistivat lukuisien menettelyvaihtoehtojen kokeilun.

Tukialueet muodostettiin koealoja yhdistelemällä. Jokaiselle koealalle laskettiin ensin tunnusluvut 3–9 kuva-alkiosta. Koealoja yhdisteltiin ensivaiheessa maastotietojen perusteella. Tukialueiden kasvaessa yhdistelyn tukena käytettiin myös Transformed Divergence ja Jeffries-Matusita Divergence -eroavuusmittareita (ks. Thomas ym. 1987). Prosessin lopputuloksena oli 30 tukialuetta, jotka edustivat 18 eri maasto-ositetta. Nämä ositteet määriteltiin maaluokan, alaryhmän (kangas tai suo), puulajin ja kehitysluokan perusteella. Tuhotietoja ei käytetty ositteluperusteena, koska tavanomaiset tuhot eivät käytännössä erotu satelliittikuvalta.

Itä-Lapin satelliittikuvaa luokitettiin Maximum Likelihood -menetelmällä käyttäen ERDAS-kuvankäsittelyohjelmiston MAXCLAX-algoritmia (ERDAS... 1990). Luokituksissa käytettiin 30 tukialuetta. ML-algoritmin yhteydessä voidaan käyttää luokkapainoja luokituskuvan jakauman oikeellisuuden lisäämiseksi (Strahler 1980). Luokkapainot valitaan luokitettavalla alueella oletettavasti vallitsevan jakauman mukaan. Ne vaikuttavat luokan määräytymiseen rajatapauksissa, joten ne lisäävät luokitustarkkuutta erityisesti

silloin, kun luokat eroavat vain vähän toisistaan (Mather 1985). Luokituskuvalla esiintyy pienipiirteistä vaihtelua, joka johtuu satelliittikuvan hyvästä erotuskyvystä (ns. salt and pepper -ilmiö). Vaihtelua tasoitettiin filtteriöllä alkuperäiset luokituskuvat ns. majority rule -algoritilla. Siinä jokaisen kuva-alkion luokaksi annetaan se luokka, jota alkion lähiympäristössä esiintyy eniten.

Painot arvioitiin ensin luokituksen tukinäytteestä. Lopullisissa luokituksissa käytetyt painot laskettiin valtakunnan metsien inventoinnin näytteestä. Luokituskuvan luokkajakaumaa voidaan parantaa edelleen painoja manipuloimalla. Kokeilemalla todettiin, että vastaavuus alkoi huonontua, kun manipuloidut painot poikkesivat liikaa 'oikeista' painoista. Kuvatasoitusta kokeiltiin erimuotoisilla ja -kokoisilla filtteriointi-ikkunoilla. Kokeilu paljasti, että ikkunan valinnalla on vaikutusta tuloksiin. Yleensä 3 x 3 kuva-alkion neliö oli lähes paras valinta filtteriöinnissä.

Painotus- ja filtteriointivaihtoehtojen tarkastelua varten luotiin atk-systeemi, joka ristiintaulukoi kuvaluokan ja todellisen maasto-ositteen tarkistusnäytteen koealoilla. Systeemi tulosti vastaavuudet kolmella eri luokkajaoilla, joissa luokkien lukumäärät olivat 18, 11 ja 6. Luokat muodostettiin yhdistämällä pienempiä luokkia keskenään. Systeemi tulosti myös tuhoalojen arviot ja kokonaistuhoalan keskivirheen laskettuna kuuden luokan perusteella. Ilman tätä apuvälinettä tutkimuksen kokeileva ja heuristinen lähestymistapa ei olisi ollut mahdollinen. Vastaavuustulokset kerrotaan lyhyesti tässä alaluussa. Tulosten laskentaa ja tuloksia käsitellään seuraavissa alaluissa.

Alkuperäinen luokituskuva oli odotusten mukaisesti hyvin virheellinen. 18 luokan jaotuksella vastaavuus oli vain 22 % ja kuuden luokan jaotuksella 36 %. Suurin sekaannus tapahtui vähäpuustoisten kankaiden ja kitumaan soiden välillä. Sekä maaluokan että alaryhmän laajamittainen virheluokitus merkitsee sitä, että käytännön metsätalouden kannalta luokituskuva oli käyttökelvoton. Painojen käyttö luokituksessa ei parantanut tilannetta tässä vertailuaineistossa. Filtteriointi paransi vastaavuuksia selvästi. Paras tulos saavutettiin käyttämällä painoja luokituksessa ja filtteriöllä luokituskuva. Silloin vastaavuudet olivat 30 % (18 luokkaa) – 45 % (6 luokkaa). 11 luokan jaotuksella tulokset olivat vain hieman huonompia kuin kuuden luokan jaotuksella.

Vertailuun käytettiin myös inventoinnin maastoaineistoa vuodelta 1993. Koealoja ei ole merkitty ilmakuville, joten ne piti paikallistaa satelliittikuvalla laskennallisten koordinaattien avulla. Sijaintitarkkuus on huonompi kuin tarkistusaineistolla, mikä ilmeni alempina vastaavuusprosentteina. Toisin kuin tarkistusaineistossa, painotus paransi vastaavuutta inventointiaineistossa myös ilman filtteriointiä.

4.3 Tulosten laskenta

Aineistot mahdollistivat tuhopinta-alojen arvioinnin kolmella eri tavalla. Inventoinnin näyte on niin edustava, että siitä saadaan hyvä arvio metsien terveydentilasta ilman satelliittikuvan informaatiotakin. Kaksi muuta menetelmää perustuvat luokitettuun otantaan. Molemmissa käytetään kuutta kuvaluokkaa, joiden pinta-alat arvioitiin satelliittikuvasta. Luokitetun otannan menetelmät eroavat toisistaan siinä kuinka kuvaluokkien jakauma maasto-ositteisiin arvioitiin. Toisessa (menetelmä a) tarkoitukseen käytettiin

tarkistusnäytettä ja toisessa (menetelmä b) inventoinnin näytettä. Tuhojen esiintyminen maasto-ositteissa arvioitiin inventoinnin näytteestä molemmissa luokitettuna otannan menetelmissä. Muut maastonäytteet eivät olleet riittäviä tähän tarkoitukseen. Matemaattisesti ilmaistuna luokitettuna otannan arviot kokonaistuhosalasta, Ad_a ja Ad_b , laskettiin kaavoilla

$$\text{Menetelmä a: } Ad_a = \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^6 A_i \times p_{ij} \times pd_j$$

$$\text{Menetelmä b: } Ad_b = \sum_{i=1}^6 A_i \times pd_i$$

Kaavoissa i viittaa kuvaluokkaan ja j viittaa maasto-ositteeseen. Symbolien merkitys on seuraava:

- A_i = kuvaluokan i pinta-ala
- p_{ij} = maasto-ositteen j osuus kuvaluokassa i
- pd_j = tuho-osuus maasto-ositteessä j
- pd_i = tuho-osuus kuvaluokassa i

Valtakunnan metsien inventoinnin näytteestä arvioituna tuhojen osuus koko kuva-alasta oli 37,6 %. Kokonaistuhualan arvio oli 6900 km² ja sen absoluuttinen keskivirhe oli 171 km² (suhteellisena 2,5 %). Luokitettuna otannan menetelmä a johti tuhoalan selvään yliarvioon, mikä johtui tarkistusnäytteen valintatavasta. Tarkistusnäytteessä oli ylijedustus vanhoista puustoisista metsistä, joissa tuhoja esiintyi eniten. Edellä todettu huono luokitustarkkuus myötävaikuttanut yliarvion syntyyn.

Luokitettuna otannan menetelmä b antoi kokonaistuhualan arvioksi 7000 km². Tämän arvion tarkkuus on käytännöllisesti katsoen sama kuin inventoinnin näytteestä lasketun arvion tarkkuus. Inventoinnin näytteestä lasketujen tulosten tarkkuutta voidaan lisätä merkittävästi vain suurin ponnistuksin. Luokitettuna otanta on tehokas menetelmä, jos luokkakeskiarvot poikkeavat selvästi toisistaan. Nyt pystyttiin erottamaan vain kaksi kuvaluokkaa, joissa tuhoja esiintyi selvästi keskimääräistä enemmän. Pelkästä inventointinäytteestä lasketut ja luokitettuna otannan menetelmällä b saadut tulokset eivät poikkeen merkittävästi toisistaan. Seuraavassa alaluvussa esitetään jälkimmäiset tulokset ja niihin liittyvä teemakartta kahdesta tuhorunsaimmasta kuvaluokasta.

4.4 Metsätuhojen esiintyminen Itä-Lapissa

Tutkimuksessa erotetaan 14 tuholajia ja kaksi tuhon vaikeusastetta. Lievä tuho ei ole muuttanut metsikön kehitysluokkaa, alentanut metsikön laatua tai lisännyt metsikön vajaatuottoisuutta. Merkittävä tuho on muuttanut metsikköä ja se jaettiin inventoinnissa todettavaan, vakavaan ja täydelliseen tuhoon (Valtakunnan... 1993). Tässä tutkimuksessa merkittävän tuhon alajakoa ei esitetä. Taulukossa 1 annetaan Itä-Lapin metsätuhojen pinta-alat ja osuusprosentit. Osuudet on arviointimenetelmästä johtuen laskettu koko kuva-alasta, vaikka tuholuokitus tehdään vain metsämaalla. Inventoinnin näytteessä metsämaan osuus kuva-alasta on 64,9 %, joten osuusprosentit metsämaalla voi laskea käyttämällä kerrointa 1,54.

Taulukko 1. Eri metsätuhojen pinta-alat ja osuusprosentit Itä-Lapissa 1993. Prosentit on laskettu koko pinta-alasta vedet mukaan lukien. Osuudet metsämaalla saadaan käyttämällä kerrointa 1,54.

| Tuhon aiheuttaja | Tuhon aste | | | | Yhteensä | |
|--|-----------------|------|-----------------|------|-----------------|------|
| | Lievä | | Merkittävä | | km ² | % |
| | km ² | % | km ² | % | km ² | % |
| 1. Syy tuntematon | 975 | 5,3 | 1100 | 6,0 | 2075 | 11,3 |
| 2. Tuuli | 142 | 0,8 | 287 | 1,6 | 429 | 2,3 |
| 3. Lumi | 238 | 1,3 | 380 | 2,1 | 618 | 3,4 |
| 4. Muut ilmastotekijät, maaperätekijät | 98 | 0,5 | 322 | 1,8 | 420 | 2,3 |
| 5. Puiden välinen kilpailu | 57 | 0,3 | 102 | 0,6 | 160 | 0,9 |
| 6. Ihminen (esim. puunkorjuu) | 55 | 0,3 | 57 | 0,3 | 113 | 0,6 |
| 7. Hirvi, muut selkärangaiset | 85 | 0,5 | 170 | 0,9 | 255 | 1,4 |
| 8. Hyönteiset | 36 | 0,2 | 21 | 0,1 | 58 | 0,3 |
| 9. Männynversosurma | 114 | 0,6 | 116 | 0,6 | 230 | 1,3 |
| 10. Lahottajasienet | 95 | 0,5 | 841 | 4,6 | 936 | 5,1 |
| 11. Männynversoruoste | 15 | 0,1 | 35 | 0,2 | 50 | 0,3 |
| 12. Tervasroso | 232 | 1,3 | 189 | 1,0 | 420 | 2,3 |
| 13. Muut sienet | 374 | 2,0 | 162 | 0,9 | 536 | 2,9 |
| 14. Monituho | 214 | 1,2 | 507 | 2,8 | 721 | 3,9 |
| Yhteensä | 2731 | 14,9 | 4290 | 23,4 | 7021 | 38,3 |

Tutkimusalue on melkein sama kuin Koillis-Suomen metsälautakunnan pohjoisosa. Kymmenen vuotta aikaisemmin tuhoprosentti metsämaalla siellä oli 22 % (Mattila 1990). Arvio oli tehty valtakunnan metsien 7. inventoinnin näytteestä. Kokonaistuhooalan osuuden arvio metsämaalla on nyt 59 %. Näyttää siis siltä, että tuhot ovat moninkertaistuneet kymmenessä vuodessa. Tulokset

eivät kuitenkaan ole yhteismitallisia, mikä johtuu pääosin kahdesta seikasta. Tuholuokitus oli uudessa inventoinnissa paljon monipuolisempi kuin aiemmin, mikä varmasti on lisännyt tuohohavaintoja. Inventoinnin aikana käynnissä ollut väittely metsätuhoista lienee vaikuttanut samaan suuntaan. Tuhoihin on maastossa kiinnitetty suurta huomiota, mihin viittaa kaksikin piirrettä tuloksissa: Lievän tuhon osuus tuhoalasta on lähes 40 % ja tuholajia ei ole voitu määrittää lähes 30 %:lla tuhoalasta.

Tutkimusalueen metsien kunto on todennäköisesti huonontunut, joskaan ei niin dramaattisesti kuin inventointinumerot näyttävät. Kuolan ilmansaasteilla ei ole todettu olevan suoraa yhteyttä metsätuhoihin (Tikkanen 1995, s. 215). 1980-luvulla sattui myrskytuhoja ja esiintyi poikkeuksellisia talvisäitä. Niiden suorat ja kerrannaisvaikutukset näkyvät metsien kunnossa helposti vuosikymmenen. Tulokset paljastavat toisenkin syyn tuhojen lisääntymiseen. Kun tuhon syy oli määritetty, lahottajasienet olivat yleisin tuhon aiheuttaja. Toiseksi yleisin tuholaji oli puuston yli-ikäisyyteen liittyvä monituho. Nämä tuholajit viittaavat huonoon metsänhoidolliseen tilaan, mikä johtuu lukuisista metsänkätön rajoituksista tutkimusalueella. Tuhot lisääntyvät tulevaisuudessa, kun järkipäiväinen metsänkätö loppuu yhä laajemmilla alueilla ja metsien uudistuminen palojen kautta estetään.

Satelliittikuvan ohjatussa luokituksessa saatiin esiin kaksi kuvaluokkaa, joissa tuhoja esiintyi selvästi keskimääräistä enemmän. Näiden kuvaluokkien tukialueet oli mitattu uudistuskypsissä männiköissä ja kuusikoissa. Inventoinnin maastonäytteessä tuhofrekvenssi oli edellisissä 82 % ja jälkimmäisissä 94 %. Luokitusvirheistä johtuen vastaavat prosentit kuvaluokissa olivat alemmat, 52 % ja 59 %. Tuhofrekvenssi koko kuva-alalla oli 38 %. Kahden tuhorunsaimman kuvaluokan sijainti Itä-Lapin kuvalla esitetään liitteen taulussa I. Kaksi tuhorunsainta kuvaluokkaa kattavat 17 % teemakartasta ja niihin sisältyy 25 % koko tuhoalasta. Rajoituksista huolimatta kartta paljastaa hyvin tuhojen ja vanhojen hoitamattomien metsien yhteyden. Yhteys tuli esiin erityisen selvästi, kun myös satelliittikuvan Venäjän puoleinen osa luokitettiin Suomessa mitattujen tukialueiden avulla.

5 MONTSEGORSK

Mikkola ja Ritari (1992) esittivät arvion Montsegorskin alueen tuhotilanteesta. Arviossa kuvataan tilanne 1980-luvun puolivälissä. Mikkola (1996) tarkasteli tuhotilanteen kehitystä jaksolla 1978–1989. Hän esitti myös useasta satelliittikuvasta koostuvan panoraamakuvan, joka kattaa Itä-Lapin kokonaan ja Länsi-Kuolan. Tässä luvussa käsitellään Montsegorskin alueella käytettyjä menetelmiä ja sieltä saatuja tuloksia em. artikkeleiden pohjalta.

5.1 Tuhotilanne 1985

Tutkimuksessa käytettiin Landsat 5 TM-kuvaa, joka syntyi 9.7.1985. Tutkimusta tehtäessä 1990-luvun alussa tuoreempaa käyttökelpoista kuvaa ei ollut saatavilla. Kuvan ajoitus kasvukauden sisällä on optimaalinen. Laatu on hyvä myös uuden TM-sensorin ansiosta. Kuva on satelliitin radalta 188 ruudusta 12. Siitä rajattiin Montsegorskin sisältävä neliömäinen alue (102 km x 102 km) tilanneanalyysiä varten (ks. kuva 1, s. 8). TM-sensorin lämpökanavalla keräämää informaatiota ei käytetty tutkimuksessa hyväksi. Samoin kuin meneteltiin Itä-Lapissa, myös Montsegorskissa käytettiin alkuperäisistä kanavista johdettuja synteettisiä kanavia. Kokeilujen perusteella tutkimukseen valittiin kaksi kasvillisuusindeksiä, joita on ennenkin käytetty metsätuhokartoitukseen (Vogelmann 1990). Indeksit olivat:

$NDVI = (TM4 - TM3) / (TM4 + TM3)$; Normalized Difference Vegetation Index

$MSI = TM5 / TM4$; Moisture Stress Index

Numerot viittaavat TM-sensorin aallonpituuskanaviin. Suhdeindekseillä voidaan vähentää topografiasta ja ilmakehästä johtuvaa 'hälyä' kuvainformaatiossa. Kuvalle tehtiin myös Tasseled Cap -muunnos, jossa käytetään kaikkia kuutta heijastuskanavaa (Crist ja Cicone 1984). TC-muunnoksessa pääosa kuvan informaatiosta tiivistetään kolmeen synteettiseen kanavaan.

Kuva-alkiot ryhmiteltiin TC-muunnoskanavien perusteella ja ryhmille laskettiin tunnusluvut, joilla kuva luokitettiin 12 luokkaan. Ryhmittely tehtiin ERDAS-kuvankäsittelyohjelmiston ISODATA-algoritilla ja luokitus sen MAXCLAS-algoritilla (ERDAS... 1990). TC-luokituskuvaan asiasisällön arvioinnissa käytettiin Lapin luonnonpuiston metsikkökuviokarttaa ja kesällä 1991 kerättyä maastohavaintoaineistoa. Satelliittikuva oli kesältä 1985, joten aikaero lienee vaikeuttanut luokituskuvaan tulkintaa maastoaineiston perusteella.

Montsegorskin alueen tuhotilanteen arvioinnissa käytettiin kasvillisuusindeksikuvia (NDVI- ja MSI-kuvat), TC-muunnoskuvia ja TC-luokituskuva. Kuvat on esitetty Mikkolan ja Ritarin (1992) artikkelissa, sivuilla 252–255. Jokainen niistä korostaa jotain erityispiirrettä tutkittavalla alueella. Nojautumalla usean kuvan informaatioon pyrittiin hälventämään edustavan maastonäytteen puuttumisesta johtuvaa epävarmuutta. Kaikesta huolimatta tuhovyöhykkeen lopullinen rajaaminen täytyi tehdä subjektiivisen harkinnan perusteella.

Eri kuvia vertaamalla ja tulkitsamalla rajattiin 'metsäkuolema-alue', jonka laajuus on 400–500 neliökilometriä. Tuhotilanne Montsegorskissa esitetään liitteen taulussa II. Alue ulottuu noin 10 km etelään ja 15 km pohjoiseen Montsegorskista. Korkeat tunturit lännessä ja idässä rajoittavat ilmansaasteiden leviämistä niissä suunnissa. Vallitsevin tuulensuunta tuntureiden välissä on pohjoiseen, mikä selittää tuhoalueen ulottumista pitemmälle siinä suunnassa. Pinta-alatulosta voidaan verrata muihin käytettävissä oleviin tietoihin. Kryuskov (1991) on käyttänyt tuholuokitusta teollisuus- ja metsäsaavikko, vakavasti vaurioitunut ja

huomattavasti vaurioitunut. Kahden ensimmäisen luokan pinta-aloiksi Montsegorskissa arvioitiin 40 km² ja 200 km², joten tämän tutkimuksen 'metsäkuolema-alue' näyttää puoleksi koostuvan huomattavasti vaurioituneista metsistä. Murmanskin metsäviranomaiset antoivat vuonna 1990 seuraavat numerotiedot Montsegorskin tuhotilanteesta (Hokajärvi ja Hökkä 1991):

- täysin tuhoutunut 40 km²
- lähes tuhoutunut 100 km²
- vakavasti vaurioitunut 310 km²
- selvästi vaurioitunut 400 km²
- vaurioitunut kaikkiaan 930 km²

Tämäkin vertailu osoittaa, että kuvaluokkaa 'metsäkuolema-alue' ei pidä ymmärtää kirjaimellisesti. Kaukokartoituksessa on tehtävä selvä ero kuvaluokan nimen ja asiasisällön välillä varsinkin ohjaamattoman luokituksen yhteydessä. Itä-Lapin satelliittikuvalla tehdyssä tutkimuksessa tuli hyvin esiin edustavan näytteen suuri merkitys kuvaluokkien sisällön selvittämisessä. Kuvaluokkien esittäminen teemakartan muodossa on perusteltua mm. visuaalisen sijaintiin perustuvan kausaalianalyysin kannalta. Tällä oli suuri merkitys nimenomaan Montsegorskin alueella tehdyssä tutkimuksessa. Visualisointimahdollisuus on ollut yksi syy kaukokartoituksen suureen suosioon monissa eri sovellutuksissa.

5.2 Tuhotilanteen muuttuminen 1978–1989

Muutosanalyysi tehtiin vertaamalla neljää eriaikaista Landsat MSS-kuvaa Montsegorskin alueesta. MSS-sensoria on käytetty Landsat-satelliiteissa ohjelman alusta (1972) alkaen, mikä on etu pitkittäistutkimuksissa. Spektrinen ja maastoerotuskyky ovat tosin huonommat kuin TM-sensorilla. Tutkimuksessa käytetyt kuvat olivat (rata, ruutu ja syntyaika): 202-12 28.6.1978, 203-12 24.7.1980, 188-12 26.6.1986 ja 188-12 5.8.1989. Kuvat vuosilta 1978 ja 1986 ajoittuvat kasvukauden sisällä ehkä hieman varhaiseen kohtaan alueen pohjoisuus huomioon ottaen. Niillä oli myös pilviä, mikä kuitenkin ei estänyt kuvien käyttöä muutosanalyyseissä.

Kuvat oikaistiin ja sovitettiin toisiinsa 80 metrin erotuskyvyllä. Kuvat sovitettiin toisiinsa myös spektrisesti Olssonin (1993) suosittamalla menetelmällä, joka perustuu monimuuttujaregressioanalyyysiin. Regressio-funktiot laadittiin mahdollisimman muuttumattomalta tausta-alueelta ja kolme vanhempaa kuvaa muutettiin niillä spektrisesti vastaamaan uusinta kuvaa. Yksityiskohdat selostetaan Mikkolan (1996) artikkelissa. Spektrinen sovitus vähentää ilmakehästä, aurinkokulmasta, kuvakulmasta, sensorin kunnosta ja fenologiasta aiheutuvia eroja eriaikaisilla kuvilla. Muunnoksen jälkeen spektrierot paljastavat paremmin todellisia muutoksia tutkittavalla alueella.

Muutosanalyysi tehtiin 30 km x 50 km kokoisella ruudulla Montsegorskin ympäristössä. Uusimmalla kuvalla tehtiin pääkomponenttianalyysi kovarianssimatriisilla. Korrelaatiomatriisin käyttömahdollisuus puuttui kuvankäsittely-ohjelmistosta. Jälkimmäinen olisi voinut antaa parempia tuloksia (Singh ja Harrison 1985). Pääkomponenttimuunnos tehtiin kaikille vanhemmille kuville käyttäen uusimmalta kovalta laskettuja kertoimia. Uusin kuva ryhmiteltiin

kahden pääkomponentin perusteella ja kaikki kuvat luokitettiin 12 luokkaan ryhmistä laskettujen tunnuslukujen perusteella. Ryhmittely ja luokitus tehtiin ISODATA- ja MAXCLAS-ohjelmilla (ERDAS... 1990). Eriaikaiset luokituskuvat esitetään liitteen taulussa III. Niitä voidaan verrata keskenään lähinnä kahden vakavimman tuholuokan osalta.

Muutosanalyysin luokituskuvat vahvistivat ja tarkensivat aiempia vuoden 1985 tilannekuvalta tehtyjä havaintoja. Tuhotilanteen kehitys tarkastelujaksolla näkyi parhaiten kahden pahimman kuvaluokan pinta-aloista. Kun kaikilta kuvilta oli poistettu samat pilvialueet, saatiin seuraavat pinta-alatulokset:

| Kuvaluokan 'nimi' | Luokituskuva | | | |
|---|--------------|------|-----------------|------|
| | 1978 | 1980 | 1986 | 1989 |
| | | | km ² | |
| 1. Lähes kaikki kasvillisuus tuhoutunut | 26 | 23 | 26 | 44 |
| 2. Puusto tuhoutunut ja aluskasvillisuus vaurioitunut | 81 | 130 | 136 | 145 |
| 1 + 2 yhteensä | 107 | 153 | 162 | 189 |
| 3. Eriasteisesti vaurioituneita havupuumetsiä | 830 | 769 | 752 | 686 |
| 4. Eriasteisesti vaurioituneita lehtipuumetsiä | 100 | 114 | 123 | 162 |

Kuvaluokkien 3 ja 4 todellista sisältöä ei voitu tulkita riittävän luotettavasti tuhojen osalta. Varsinaisten tuholuokkien 1 ja 2 pinta-ala kasvoi lähes 80 % yhdentoista vuoden aikana, mikä tekee keskimäärin noin 750 ha vuodessa. Ajallisesti muutos näyttää kuitenkin tapahtuneen hyvin epätasaisesti. Myös lehtipuumetsien kuvaluokka on lisääntynyt selvästi. Havupuumetsien kuvaluokasta on tapahtunut siirtymää sekä varsinaisiin tuholuokkiin että lehtipuuluokkaan, mikä näkyy seuraavasta ristiintaulukoinnista:

| Kuvaluokka 1978 | Kuvaluokka 1989 | | | | Yht. |
|--------------------|-----------------|-----|---------------------------|-----|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| | | | Pinta-ala km ² | | |
| 1 | 7 | 6 | 11 | 2 | 26 |
| 2 | 15 | 36 | 28 | 2 | 81 |
| 3 | 21 | 101 | 607 | 101 | 830 |
| 4 | 1 | 3 | 40 | 56 | 100 |
| Yht. | 44 | 145 | 686 | 162 | 1037 |

Tuholuokkiin on siirtynyt havupuuluokasta 15 % ja lehtipuuluokasta vain 4 %. Toisin päin tarkasteltuna paljastuu, että vuoden 1978 tuholuokista on siirtynyt pois 50 % luokassa 1 ja 37 % luokassa 2. Tämän tutkimuksen perusteella ei voida selvittää kuinka paljon tämänsuuntaisesta siirtymisestä on todellista 'parantumista'. Varmaa on, että luokitusvirheillä on osuutta tulokseen. Tulokset osaltaan ilmentää kaukokartoitukseen liittyvää epävarmuutta.

Tuhotilanteen kehitystä tarkasteltiin myös NDVI-arvon muuttumisen avulla. Tämän kasvillisuusindeksin arvo alenee, kun kasvillisuus vähenee tai/ja kasvillisuuden fysiologinen kunto huonontuu. Osakuvalla sijoitettiin pohjois-eteläsuuntainen 2 km x 40 km kaista, joka kulki Montsegorskin kaupungin kautta. Kaistan leveys oli 25 kuva-alkiota, joista laskettiin keskiarvot ja keskiarvoista tehtiin NDVI-kuvaaja koko kaistan pituudelle. Kuvaajat laadittiin

kaikista neljästä eriaikaisesta MSS-kuvasta spektrisen sovituksen jälkeen. Käyrät yhdistettiin samaan akselistoon visuaalista tarkastelua varten.

Kaikilla NDVI-kuvaajilla on minimi Montsegorskin kaupungin etelälaidalla. Tästä käyrät nousevat jyrkästi siirryttäessä kaistalla etelään ja paljon loivemmin siirryttäessä kaistalla pohjoiseen. Teollisuuden vaikutus näkyy kuvaajista 10 km etelään ja yli 20 km pohjoiseen. Tuhotilanteen kehitys näkyy käyrien keskinäisessä järjestyksessä. Tuhot ovat lisääntyneet koko tarkastelujakson ajan alueella, joka ulottuu kaupungista noin 5 km etelään ja 15–20 km pohjoiseen. Vaurioalueen reunamilla kehitys on ollut epäyhtenäistä. Saastevaikutuksen vähentyessä luontainen vaihtelu tulee paremmin esille. Asiaan voi vaikuttaa myös fenologia, koska satelliittikuvat ovat kasvukauden eri vaiheista.

NDVI-kuvaajat tukivat tässä tutkimuksessa aikaisemmin tehtyjä havaintoja ja johtopäätöksiä. Tämä koskee erityisesti saastevaikutuksen ulottuvuutta pohjois-eteläsuunnassa. Samanlaista tarkastelua ei voitu tehdä itä-länsisuunnassa tunturien, pilvien ja järvien vuoksi.

5.3 Panoraama Itä-Lapista ja Länsi-Kuolasta

Laaja-alaisen yleiskuvan saamiseksi neljästä Landsat 5 TM-kuvasta koottiin panoraama, joka kattaa Itä-Lapin ja Länsi-Kuolan Kuusamosta Jäämerelle. Panoraaman satelliittikuvat ikäjärjestyksessä ovat (rata, ruutu, syntyaika ja nimi):

- 188-12 09.7.1985 Montsegorsk (käytettiin tuhotilanteen kartoituksessa)
- 191-11 20.7.1987 Nikel
- 189-13 31.8.1990 Kelloselkä (käytettiin Itä-Lapin tutkimuksessa)
- 190-12 13.7.1993 Korvatunturi

Panoraaman rajat ja rakenne on esitetty tämän artikkelin kuvassa 1 (sivu 8). Rakenteen yksityiskohdat selviävät kuvaliitteen taulusta IV. Satelliittikuvat oikaistiin yhtenäiskoordinaatistoon ja kanava-arvoille tehtiin ns. keskiarvo-korjaus. Lähes pilvettömien kuvien ansiosta panoraama on aukoton ja tarkka. Panoraaman laatua alentaa ajallinen epäyhtenäisyys. Aikaero Korvatunturin kuvalta on kahdeksan vuotta Montsegorskiin, kuusi vuotta Nikeliin ja kolme vuotta Kelloselkään. Spektrisestä sovituksesta huolimatta kuvien välillä ilmenee sävyeroja. Ero Kelloselän ja Korvatunturin välillä on selvä, mikä johtunee pääasiassa Kelloselän kuvan myöhäisestä ajankohdasta kasvukaudella. Muut kolme kuvaa ovat sekä aurinkokulman että fenologian suhteen jokseenkin samanlaisia.

Panoraamaan valittiin TM-sensorin kanavat 6 (lämpökanava), 4 (lähi-infra) ja 1 (sininen) ja niille annettiin värit punainen, vihreä ja sininen vastaavassa järjestyksessä. Kanavien 1 ja 4 valinta on hyvin perusteltavissa niiden informaatiolla. Lämpökanavalla tehtiin tutkimus 50 km x 50 km kokoiselta alueelta Nikelin ja Zapoljarnyin kaupunkien ympärillä. Tutkimuksessa käytettiin 1 km x 1 km kuva-alkiota. Lämpökanava rekisteröi pintalämpötilaa, joka eroosioalueilla oli korkeampi kuin muualla. Tulos oli hyvin nähtävissä analogiselta lämpökuvulta. Lämpökanavan arvojen ja rikkidioksidimallista

(Tuovinen ym. 1993) johdettujen SO₂-arvojen korrelaatio oli 0,59. Nikelin alueen tutkimustulokset viittaavat siihen, että selvien tuhojen pinta-ala oli siellä pienempi kuin Montsegorskissa.

Koko panoraaman päälle sovitettu SO₂-isokäyrämalli tukee päätelmiä Montsegorskin ja Nikelin tuhojen yhteydestä rikkidioksidipäästöjen kanssa (ks. liitteen taulu IV). Tuhoalueet erottuvat hyvin lämpökanavalla ja näkyvät sen vuoksi punaisina. Niiden laajuutta ja muotoa voidaan selittää 40:n ja 60:n mikrogramman (SO₂-pitoisuus kuutiometrissä ilmaa) isokäyrillä. SO₂-pitoisuus alenee Suomeen päin ollen mallin mukaan Itä-Inarissa 3–10 ja Sallassa 2–3 mikrogrammaa. Korkeimmat arvot Suomen alueella vaikuttavat epifyyttijäkälisiin (Tikkanen 1995, s. 118). Luonnostaan puuttomilla ja vähäpuustoisilla alueilla lämpökanava paljastaa myös porojen laidunnuksen aiheuttamaa jäkäläköiden kulumista. Tämä on selvästi nähtävissä satelliittikuvalta Venäjän rajan ansiosta sekä Suomen että Norjan alueella. Jäkäläköet ovat paremmassa kunnossa heti rajan itäpuolella, koska poronhoitoa ei harjoiteta Länsi-Kuolassa.

6 YHTEENVETO

Ilmansaasteiden epäillään vaurioittavan metsiä laajoilla alueilla Euroopassa ja Pohjois-Amerikassa. Puiden harsuuntumista ryhdyttiin seuraamaan pysyvillä koealoilla Euroopassa 1980-luvulla. Puhtaammasta ilmasta huolimatta puiden harsuuntumisaste Suomessa on Euroopan keskitasoa, mikä johtuu Suomen äärevämmistä olosuhteista. Metsien terveydentila on selvästi huonompi Lapissa kuin Etelä-Suomessa, mitä voidaan selittää puuston rakenteen, ilmaston ja kasvupaikkojen eroilla.

Asutus, teollisuus ja liikenne ovat lisänneet ilmansaasteita myös Lapissa. Ilmassa rajojen ulkopuolelta kulkeutuvat epäpuhtaudet nousivat erityisen huomion kohteeksi 1980-luvulla. Tiedossa oli, että Länsi-Kuolan metallurgian laitoksilla oli alettu käyttää aikaisempaa selvästi runsasrikkisempää malmia. Kasvaneiden rikkipäästöjen oletettiin kohottavan SO₂-pitoisuuksia Itä-Lapin ilmassa ja aikaa myöten olevan uhka myös metsien terveydelle Itä-Lapissa.

1980-luvun lopulla Lapissa esiintyi metsätuhoja, joilla saattoi epäillä olevan yhteyttä ilmansaasteisiin. Epätietoisuuden hälventämiseksi pantiin alulle tutkimuksia, joista syntyi Itä-Lapin metsävaurioprojekti vuonna 1989. Yhdessä osaprojektissa kartoitettiin Itä-Lapin ja Länsi-Kuolan metsätuhoja satelliittikuvien avulla. Tutkimus jaettiin kahteen osaan, joissa keskityttiin eri alueisiin ja käytettiin erilaisia menetelmiä. Tutkimus sai maa- ja metsätalousministeriön yhteistutkimusrahaa vuosina 1990–95.

Satelliittikuvatutkimus kesti kuusi vuotta ja sen menetelmiä ja tuloksia on esitelty suomen- ja englanninkielisissä artikkeleissa. Tämä artikkeli on ko. osatutkimuksen loppuraportti, jossa menetelmät, tulokset ja johtopäätökset esitetään kootusti ja mahdollisimman yleistajuisesti suomen kielellä. Raportointivelvollisuuden täyttämisen lisäksi artikkelilla pyritään lisäämään satelliittikuvatekniikoiden ja niihin liittyvän sanaston tuntemusta Suomessa.

Tavanomaisten metsäsairauksien suora kartoitus satelliittikuvalta on vaikea tehtävä, jossa ei yleensä onnistuta käytännössä. Länsi-Kuolassa on metalliteollisuuden aiheuttamia metsätuhoalueita, jotka erottuvat hyvin myös satelliittikuvalta. Sellaisia tuhoja ei ole Itä-Lapissa. Toisin kuin Itä-Lapissa, Länsi-Kuolasta ei ollut mahdollista kerätä objektiivista ja edustavaa maastoaineistoa tutkimuksen aikana. Itä-Lapin metsien terveydentilaa arvioitiin tukeutumalla vahvasti maastoaineistoihin. Siellä satelliittikuvainformaation rooli muodostui lähinnä täydentäväksi. Länsi-Kuolassa sen sijaan päätulokset saatiin satelliittikuvien ansiosta. Niiden tulkinta siellä perustui pitkälle päättelyyn, jonka tukena oli maastohavainnot subjektiivisesti valituilta kohteilta.

Tutkimusalueet rajattiin käyttökelpoisten satelliittikuvien perusteella (kuva 1, s. 8). Seuraavassa käsitellään ensin Itä-Lapin ja sitten Montsegorskin tuloksia.

Itä-Lapin Landsat 5 TM-kuva syntyi syyskesällä 1990. Sen suomenpuoleiselta alueelta mitattiin systemaattiset maastonäytteet sekä kuvan ohjattua luokitusta että luokituksen tarkistamista varten. Koealojen sijainti kuvalla määritettiin noin 10 metrin tarkkuudella. Luokitusavaimina käytettiin samantyyppisten koealojen joukoista laskettuja tunnuslukuja. Luokituksessa käytettiin alkuperäisistä kuvakanavista johdettuja synteettisiä kanavia. Luokitus tehtiin maximum likelihood-algoritmilla ja siinä kuvaluokille annettiin ennakkotodennäköisyydet. Luokituskuvan vaihtelua vähennettiin filteröinnillä. Kuvaluokkien asiasisältöä tutkittiin tarkistusnäytteen koealoilla. Vertailu paljasti kaksi kuvaluokkaa, joissa metsätuhoja esiintyi selvästi keskimääräistä enemmän. Näiden kuvaluokkien tukialueisiin kuuluvat koealat oli mitattu mänty- ja kuusivaltaisissa uudistuskypsissä metsissä. Kahden tuhorunsaimman kuvaluokan sijainti Itä-Lapin tutkimusalueella esitetään liitteen taulussa I.

Tutkimusalueella mitattiin valtakunnan metsien inventoinnin maastonäyte kesällä 1993. Näyte oli kymmenkertainen tuhotutkimuksen maastonäytteisiin verrattuna. Myös inventoinnin koealat voitiin paikallistaa luokituskuvalle, joskin niiden sijaintitarkkuus oli huonompi. Tavanomaisten metsäsairauksien pinta-alat arvioitiin luokitetun otannan periaatteella. Metsätuhojen pinta-alasta saatiin yliarvio, kun kuvaluokkien asiasisältö arvioitiin tarkistusnäytteestä. Tämä johtui siitä, että tarkistusnäytteessä oli yliedustus tuhorunsaimmista metsäositteista. Tästä syystä lopullisten tulosten laskennassa käytettiin inventoinnin näytettä. Tutkimuksessa erotettiin 14 tuholajia ja ne kukin jaettiin kahteen vaikeusasteeseen. Pinta-alat ja tuhoprocentit esitetään taulukossa 1 (s. 13).

Tavanomaisia metsäsairauksia esiintyi 59 %:lla metsämaan alasta. Tutkimusalueelta on arvio metsien terveydestä myös vuodelta 1983. Näyttää siltä, että metsätuhot ovat moninkertaistuneet kymmenessä vuodessa. Tulokset eivät kuitenkaan ole vertailukelpoisia. Uuden inventoinnin tuholuokitus oli monipuolisempi ja metsätuhoihin kiinnitettiin nyt suurempaa huomiota kuin ennen. Metsien terveys tutkimusalueella lienee kuitenkin huonontunut jossain määrin. Tulosten tarkempi analyysi viittaa huonoon metsänhoidolliseen tilaan uudistuskypsissä männiköissä ja kuusikoissa. Suojelun vuoksi yhä uusia alueita siirtyy pois talouskäytöstä ja metsien kunto heikkenee, koska metsäpalojakaan ei sallita suojelualueilla. Heikkokuntoiset metsät kestävät ilmansaasteita

huonosti, joten mahdollisuus todellisten metsäkuolema-alueiden ilmaantumiselle kasvaa aikaa myöten.

Jälkikäteen tarkasteltuna Itä-Lapin tutkimusmenetelmät eivät olleet optimaalisia. Maastotöiden painopisteen olisi pitänyt olla tarkistusnäytteessä ja näytteen olisi pitänyt olla täysin systemaattinen. Subjektiiivinen näyte luokitusta varten olisi kenties ollut parempi kuin objektiivinen näyte. Luokitusavaimien kehittäminen oli liian monimutkainen prosessi. Synteettisten kanavien käyttö ei antanut merkittävää etua, jos lainkaan. Sen sijaan alkuperäisten kanava-arvojen korjaaminen mm. topografian suhteen olisi voinut lisätä luokitustarkkuutta. Tutkimuksesta saatiin kuitenkin käyttökelpoisia tuloksia ja niitä voitiin visualisoida satelliittikuvan ansiosta. Tulosten paikkasidonnaisuuden merkitys on lisääntymässä, mikä on eräs syy kaukokartoituksen suosion kasvulle erilaisissa tehtävissä.

Montsegorskin ympäristön tuhotilannetta tutkittiin neliömäisellä alueella, jonka sivut olivat 102 km. Landsat 5 TM-kuva oli vuodelta 1985, joten se oli hieman vanhentunut. Kuvasta tehtiin kaksi kasvillisuusindeksikuva, kolme Tasseled Cap -muunnoskuva ja yksi luokituskuva. Luokitus tehtiin TC-muunnoskanavilla ilman maastotukiaineistoa. Eri kuvat tuovat esiin erilaista informaatiota, mikä auttoi kuvien tulkinnassa. Tuhoalueen rajauksia tarkistettiin myös paikan päällä maastossa. Montsegorskin 'metsäkuolema-alueen' laajuus kesällä 1985 oli arvion mukaan 400–500 km² (liitteen taulu II). Alue ulottui kaupungista noin 10 km etelään ja 15 km pohjoiseen. Aluetta rajoittaa korkeat tunturit sekä lännessä että idässä. Tulosta verrattiin muiden käytettävissä olevien pinta-alatietojen kanssa. Vertailu viittasi siihen, että rajattu tuhoalue sisälsi paljon myös eläviä metsiä. Murmanskin metsäviranomaisten mukaan kasvillisuus oli täysin tai lähes täysin tuhoutunut 140 neliökilometrin alueelta vuonna 1989.

Montsegorskin tuhotilanteen muuttumista tutkittiin 30 km x 50 km ruudulla. Tutkimuksessa käytettiin neljää Landsat MSS-kuva, jotka olivat vuosilta 1978, 1980, 1986 ja 1989. Eriaikaiset satelliittikuvat sovitettiin keskenään geometrisesti ja spektrisesti. Spektrisellä sovituksella vähennetään kuva- ja aurinkokulmasta, ilmakehästä, fenologiasta ja sensorin kunnosta aiheutuvia eroja kuvilla. Kaikille kuville tehtiin pääkomponenttimuunnos käyttäen uusimmalta kuvalla laskettuja kertoimia. Uusin kuva ryhmitettiin kahdella pääkomponentilla ja kaikki kuvat luokiteltiin 12 luokkaan näistä ryhmistä laskettujen tunnuslukujen perusteella. Tuhotilanteen muuttuminen tuli esiin kahden pahimman luokan pinta-aloissa (ks. liitteen taulu III). Niiden yhteenlaskettu ala kasvoi kaudella 1978–1989 lähes 80 % ollen tuoreimmalla kuvalla 189 km². Myös lehtipuuvaltaiset metsät lisääntyivät selvästi. Siirtymää tuholuokkiin tapahtui pääosin havupuuvaltaisista metsistä. Myös siirtymää pois tuholuokista oli suhteellisen paljon. On mahdollista, että melkoinen osa 'parantumisesta' on luokitusvirheitä.

Tuhotilanteen muuttumista tutkittiin myös NDVI-kasvillisuusindeksin avulla. Indeksiarvon kuvaajat eri ajankohtina laadittiin kapealta kaistalta Montsegorskin kaupungista etelään ja pohjoiseen. Kaikilla kuvaajilla oli selvä minimi kaupungin tienoilla ja kaupungin vaikutus näkyi kuvaajissa noin 10 km etelään ja yli 20 km pohjoiseen. Indeksiarvot olivat alentuneet koko tarkastelujakson ajan noin 5 km etelään ja 15–20 km pohjoiseen kaupungista.

Kauempana kehitys oli epäyhtenäistä. Indeksitarkastelu tuki luokituskuvilta saatuja tuloksia ja koko muutosanalyysi tarkensi ja vahvisti vuoden 1985 tilannetta koskevia arvioita.

Neljän TM-kuvan panoraama kattaa Itä-Lapin ja Länsi-Kuolan Kuusamosta Jäämerelle (liitteen taulu IV). Kuvat ovat syntyneet vuosina 1985, 1987, 1990 ja 1993. Panoraamassa käytettiin TM-sensorin kanavia 6, 4 ja 1 antamalla niille värit punainen, vihreä ja sininen, samassa järjestyksessä. Kuvilla näkyy sävyeroja spektrisestä korjauksesta huolimatta. Panoraama on ajallisesti epäyhtenäinen. Aikaeroa vierekkäisten satelliittikuvien välillä on enimmillään kahdeksan vuotta. Panoraama on kuitenkin aukoton ja tarkka, sillä satelliittikuvat ovat lähes pilvettömiä. Pahimmat tuhoalueet Montsegorskissa ja Nikelissä näkyvät punaisina, mikä johtuu niiden ympäristöstä korkeammasta lämpötilasta. Panoraamaan sovitettiin myös rikkidioksidin leviämismalli. Pahimmilla tuhoalueilla pitoisuudet olisivat mallin mukaan yli 40–60 mikrogrammaa kuutiometrissä ilmaa (vuosikeskiarvo). Nikelin alueella tehdyssä tutkimuksessa SO₂-pitoisuuksien ja lämpökanavan arvojen välillä todettiin selvä positiivinen korrelaatio.

Lämpökanava paljasti myös porojen laiduntamisen aiheuttamaa kenttä- ja pohjakerroksen kulumista vähäpuustoisilla alueilla Suomessa ja Norjassa. Venäjän rajan sijainti erottuu panoraamassa hyvin, koska poronhoitoa ei harjoiteta Länsi-Kuolassa. Heti rajan itäpuolella jäkälিকöt ovat hyvässä kunnossa, joten ilmansaasteet eivät ole syy länsipuolisten jäkälिकöiden huonoon tilaan. SO₂-mallin mukaan metallisulattojen vaikutus Itä-Lapissa on 2–10 µg/m³. Korkeimmat arvot esiintyvät Inarin itäosissa Nikelin vaikutuksesta. Siellä saasteet aiheuttavat muutoksia mm. naavojen ja luppen fysiologiassa.

Länsi-Kuolassa tehty kartoitus tuotti käyttökelpoisia tuloksia, ongelmista huolimatta. Pilvisyyden ja lyhyen kesän johdosta käyttökelpoisia kuvia oli vähän. Kuvien tulkinta oli vaikeata rajallisen maastohavainnointiaineiston vuoksi. Digitaalisia aputietoja ei juuri ollut saatavilla. Kanava-arvojen korjaaminen digitaalisella maastomallilla olisi ehkä edistänyt kartoitusta. Itä-Lapin metsävaurioprojektin aikana luotu SO₂-leviämismalli oli johtopäätösten kannalta hyödyllinen. Satelliittikuvainformaation monipuolisuus ja suuret visualisointimahdollisuudet auttoivat kuvien tulkinnassa paljon. Kuville rajatut tuhoalueet ja kuvaluokituksissa erottuneet tuholuokat eivät ole täystuhoalueita. Kuvaluokan nimen ja sen asiasisällön välinen ero on pidettävä mielessä kaikissa kaukokartoitussovelluksissa.

Itä-Lapin metsävaurioprojektin satelliittikuvakartoitus paljasti Länsi-Kuolan teollisuustuhoalueiden sijainnin, laajuuden ja muodon. Toisaalta se tuotti tietoa Itä-Lapin metsien terveydestä ja siihen vaikuttavista tekijöistä. Metsävaurioprojektin muiden tutkimusten mukaan Länsi-Kuolan rikkipäästöt eivät ole ainakaan toistaiseksi sanottavasti vaikuttaneet Itä-Lapin metsien terveyteen. Tavanomaiset metsäsairaudet lisääntyvät tulevaisuudessa metsien suojelun seurauksena, mikä altistaa metsiä myös saastetuhoille. Ikään kuin sivutuotteena tutkimus toi esiin myös poronjäkälिकöiden kuluneisuuden. Myös sillä epäillään olevan negatiivisia vaikutuksia puiden terveyteen.

KIRJALLISUUS

- Allum, J. & Dreisinger, B. 1987. Remote sensing of vegetation change near Inco's Sudbury mining complexes. *International Journal of Remote Sensing* 8(3): 399–416.
- Chatterjee, R., Bannerjee, D., Roy, J. & Bhattacharya, A. 1994. Landsat TM data processing techniques for identifying and delineating environmental impacts of coal mining. *ITC Journal* 1994-2: 155–162.
- Cohen, W. 1991. Response of vegetation indices to changes in three measures of leaf water stress. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 57(2): 195–202.
- Crist, E. & Cicone, R. 1984. A physically-based transformation of Thematic Mapper data - the TM Tasseled Cap. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-22(3): 256–263.
- EC-UN/ECE 1995. Forest condition in Europe. 1995. Results of the 1994 survey. Brussels, Geneva. 106 s. + app. 80 s.
- ERDAS Image Processing Module, version 7.4. 1990. Erdas Inc., Atlanta, USA. 218 s.
- Gillis, M., Pick, R. & Leckie, D. 1990. Satellite imagery assists in the assessment of hail damage for salvage harvest. *The Forestry Chronicle* 66(5): 463–468.
- Gimbarzevsky, P. 1984. Remote sensing in forest damage detection and appraisal - selected annotated bibliography. Environment Canada, Canadian Forestry Service, Pacific Forest Research Centre, Information Report BC-X-253. 55 s.
- Hall, R., Dams, R. & Lyseng, L. 1991. Forest cut-over mapping from SPOT satellite data. *International Journal of Remote Sensing* 12(11): 2193–2204.
- , Kruger, A., Scheffer, J., Titus, S. & Moore, W. 1989. A statistical evaluation of Landsat TM and MSS data for mapping forest cutovers. *The Forestry Chronicle* 65(6): 441–449.
- Hokajärvi, R. & Hökkä, H. 1991. Retkellä Kuolan metsissä. *Metsänhoitaja* 1/1991: 14–17.
- Hotelling, H. 1933. Analysis of a complex of statistical variables into principal components. *Journal of Educational Psychology* 24: 417–498.
- Häme, T. 1991. Spectral interpretation of changes in forest using satellite scanner images. *Seloste: Metsän muutosten spektrin tulkinta satelliittikeilainkuvien avulla*. Acta Forestalia Fennica 222. 111 s.
- Jalkanen, R. 1990. Vauriot Lapin luonnossa talven 1986–87 jälkeen. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 347: 31–33.
- , Airaksinen, K. & Niska, K. 1990. Juurten jäädytyskokeet Hietaperänkankaalla. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 347: 43–47.
- & Käitera, J. 1992. Versosurma Itä-Lapissa. Abstract: Damage caused by Gremmeniella abietina in eastern Lapland. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 413: 215–226.

- Kauhanen, H. & Varmola, M. (toim.). 1992. Itä-Lapin metsävaurioprojektin väliraportti. Abstract: The Lapland Forest Damage Project, Interim report. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 413: 266 s.
- Kauppi, P., Kenttämies, K., Oikarinen, S. & Valli, R. 1987. Happamoituminen Suomessa. Ympäristöministeriö, Ympäristön- ja luonnonsuojeluosasto, Sarja A, 57/1987. Helsinki. 97 s.
- Kauth, R. & Thomas, G. 1976. The Tasseled Cap - a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. *Proceedings of the 2nd Annual Symposium on Machine Processing of Remotely sensed Data, held at Purdue University, West Lafayette, Indiana, 4B: 41–51.*
- Kenneweg, H., Förster, B., Runkel, M. & Winter, R. 1989. Satellitenbilder zur Waldschadenserfassung - wo liegen die Probleme. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 160(4): 73–76.
- Koch, B., Ammer, U., Schneider, T. & Wittmeier H. 1990. Spectroradiometer measurements in the laboratory and in the field to analyse the influence of different damage symptoms on the reflection spectra of forest trees. *International Journal of Remote Sensing* 11(7): 1145–1163.
- Kryuskov, V. 1991. Heavy metal accumulation in spruce needles and changes of northern taiga ecosystems. Julkaisussa: Pulkkinen, E. (toim.). *Environmental geochemistry in northern Europe. Ecological survey of Finland. Special Paper 9: 177–187.*
- Kuntz, S. & Zimmermann, C. 1993. Erfassung von Sturmschäden im nördlichen Schwarzwald mit Satellitendaten. Summary: Inventory of storm damages in northern Black-Wood-Forest using satellite data. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 164(8): 150–155.
- Kuusela, K. 1994. Forest resources in Europe 1950–1990. European Forest Institute, Research report 1. Cambridge University Press. 154 s.
- Lapin lääninhallitus, ympäristönsuojelutoimisto. 1992. Lapin läänin ja Murmanskin alueen sekä Pohjois-Norjan ja Pohjois-Ruotsin ilmansuojelu vuonna 1990. Lapin lääninhallituksen julkaisusarja 1992: 15. 25 + 6 s.
- Markham, B. & Barker, J. 1985. Spectral characterization of the LANDSAT Thematic Mapper sensors. *International Journal of Remote Sensing* 6(5): 697–716.
- Mather, P. 1985. A computationally-efficient maximum-likelihood classifier employing prior probabilities for remotely-sensed data. *International Journal of Remote Sensing* 6(2): 369–376.
- Mattila, E. 1990. Eräiden metsätuhojen esiintyminen Pohjois-Suomessa valtakunnan metsien inventoinnin mukaan. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 347: 100–113.
- 1992. Satelliitin rekisteröimän spektrisen informaation käyttömahdollisuudet metsävauriokartoituksessa. Abstract: Potential usage of satellite spectral information in forest damage assessment. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 413: 227–243.
- 1995. Forest health in eastern Finnish Lapland in 1993. Use of satellite and field information in a forest damage survey. Seloste: Itä-Lapin metsien terveys 1993. Satelliitti- ja maastoinformaation käyttö metsävauriokartoituksessa. Käsikirjoitus. 40 s.

- Meer Mohr, H. van der, Woldai, T. & Dijk, P. van 1992. Image processing for detecting environmental pollution in a coal mining district, Montalban area, Spain. *ITC Journal* 1992-2: 148–153.
- Metsäntutkimuslaitoksen metsätilastollinen tietopalvelu 1995. Metsätilastollinen vuosikirja 1995. Suomen virallinen tilasto. Maa- ja metsätalous 1995: 5. 354 s.
- Mikkola, K. 1996. A remote sensing analysis of vegetation damage around metal smelters in Kola Peninsula, Russia. Manuscript (to be published in *International Journal of Remote Sensing*).
- & Ritari, A. 1992. Montsegorskin alueen metsävauriot - alustava satelliittikuvatulkinta. Abstract: Forest damages in Monchegorsk, Kola Peninsula. A preliminary satellite image analysis. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 413: 244–260.
- Olsson, H. 1993. Regression functions for multitemporal relative calibration of Thematic Mapper data over boreal forest. *Remote Sensing of Environment* 46: 89–102.
- 1994. Monitoring of local reflectance changes in boreal forests using satellite data. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Biometry and Forest Management, Remote Sensing Laboratory, Report 7. Dissertation. 39 + 81 s.
- Penttilä, T. 1990. Männyn neulasvuosikertojen lukumäärä turvemailla 1985–88 Pohjois-Suomessa. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 347: 113–122.
- Rathore, C. & Wright, R. 1993. Monitoring environmental impacts of surface coal mining. *International Journal of Remote Sensing* 14(6): 1021–1042.
- Ritari, A. 1990. Talven 1986-87 sääolojen poikkeuksellisuus ja pakkasvauriot Pohjois-Suomessa. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 347: 47–57.
- Rock, B., Skole, D. & Choudhury, B. 1993. Monitoring Vegetation Change Using Satellite Data. Julkaisussa: Solomon, A. & Shugart, H. (toim.). 1993. *Vegetation Dynamics & Global Change*. Chapman & Hall. New York. 338 s.
- Singh, A. & Harrison, A. 1985. Standardized principal components. *International Journal of Remote Sensing* 6(6): 883–896.
- Sterba, H. 1995. Forest decline and increasing increments: a simulation study. *Forestry* 68(2): 153–163.
- Strahler, A. 1980. The use of prior probabilities in maximum likelihood classification of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment* 10: 135–163.
- Thomas, I., Ching, N., Benning, V. & D'Aguzzo, J. 1987. A review of multichannel indices of class separability. *International Journal of Remote Sensing* 8(3): 331–350.
- Tikkanen, E. (toim.). 1995. Kuolan saastepäästöt Lapin metsien rasitteena. Itä-Lapin metsävaurioprojektin loppuraportti. Gummerus Kirjapaino, Jyväskylä. 232 s.
- & Raitio, H. 1990. Ilmastostressi ja ilmansaasteet - kesän 1987 neulaskadon syytä. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 347: 34–42.
- & Raitio, H. 1990/91. Nutrient stress in young Scots pines suffering from needle loss in a dry heath forest. *Water, Air, and Soil pollution* 54: 281–293.

- Tuovinen, J., Laurila, T., Lättilä, H., Ryaboshabko, A., Brukhanov, P. & Korolev, S. 1993. Impact of the sulphur dioxide sources in the Kola Peninsula on air quality in northernmost Europe. *Atmospheric Environment* 27A: 1379–1395.
- Tömmervik, H., Johansen, B. & Pedersen, J. 1992. Use of multitemporal Landsat image data for mapping of the effects of air pollution on vegetation in the Kirkenes-Pechenga area in the period 1973–1988. FORUT IT A/S 1992. 32 s.
- Valtakunnan metsien 8. inventointi, kenttätöiden ohjeet. 1993. Koillis-Suomen ja Lapin versio. Metsäntutkimuslaitos, metsien käytön tutkimusosasto. Helsinki. 75 s. + liitteet.
- Vogelmann, J. 1990. Comparison between two vegetation indices for measuring different types of forest damage in the north-eastern United States. *International Journal of Remote Sensing* 11(12): 2281–2297.

51 lähdettä

KUVALIITE

FM Kari Mikkola on valmistanut kaikki taulut. Ne on esitetty aiemmin seuraavissa tutkimusraporteissa: Mattila 1995 (taulu I), Tikkanen (toim.) 1995 (taulu II) ja Mikkola 1996 (taulut III ja IV).

Taulu I

Kahden tuhorunsaan kuvaluokan alueellinen jakauma. Kuvaluokkien tukialueet mitattiin uudistuskypsissä mäntyvaltaisissa metsissä (keltainen väri) ja uudistuskypsissä kuusivaltaisissa metsissä (punainen väri).

Taulu II

Montsegorskin tuhotilanne vuonna 1985. Taulussa pohjoinen on ylhäällä. 'Metsäkuolema-alue' on väritetty punaisella. Muut kuvaluokat on väritetty seuraavasti:

Ruskeat sävyt – havupuuvaltainen
Vihreät sävyt – lehtipuuvaltainen
Keltainen – taimikot, suot tms.
Harmaat sävyt – pilvet, kasvittomat alueet ja tunturit
Sininen – vedet

Tauluun on merkitty Montsegorskin kaupungin sijainti ja joitakin korkeuksia merenpinnasta. Vasen alanurkka on taustaa.

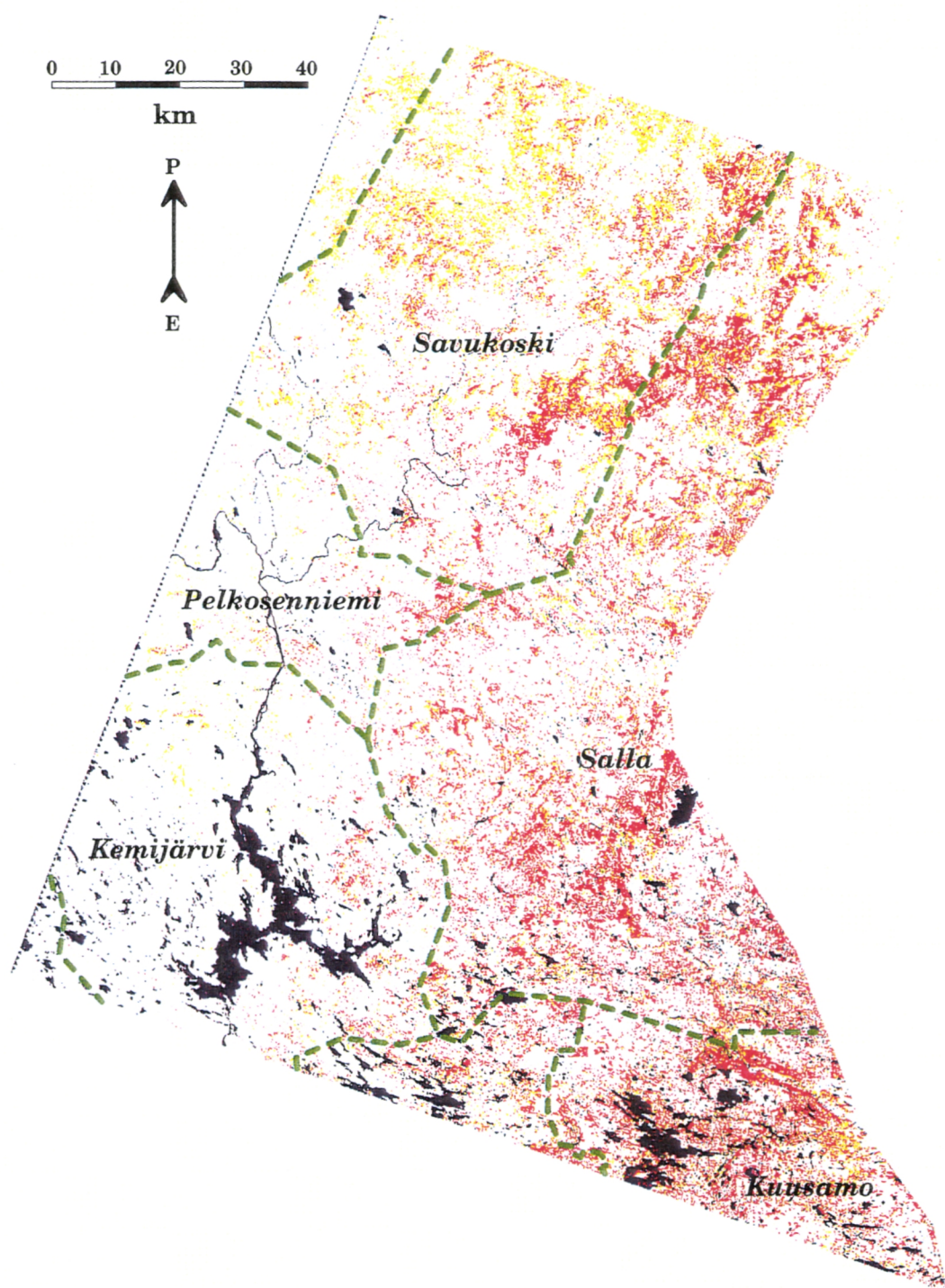
Taulu III

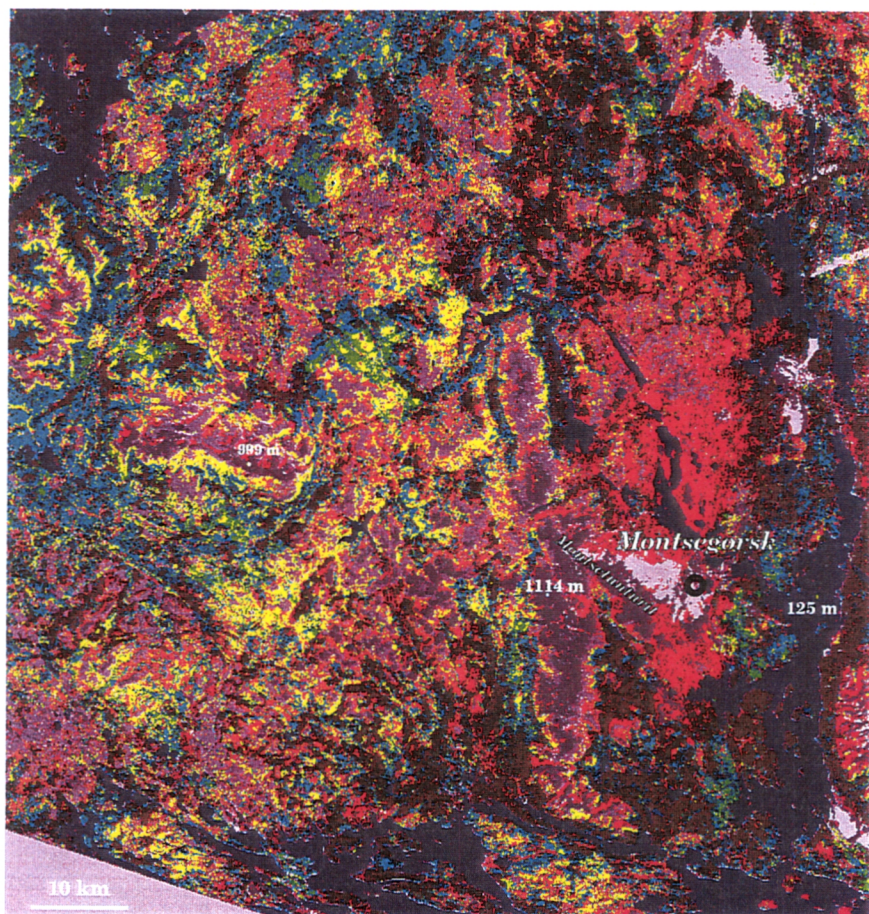
Montsegorskin tuhotilanteen muuttuminen. Taulussa pohjoinen on ylhäällä. Kuvat ovat vuosilta 1978, 1980, 1986 ja 1989 vasemmalta lukien. Värit liittyvät kuvaluokkiin seuraavasti:

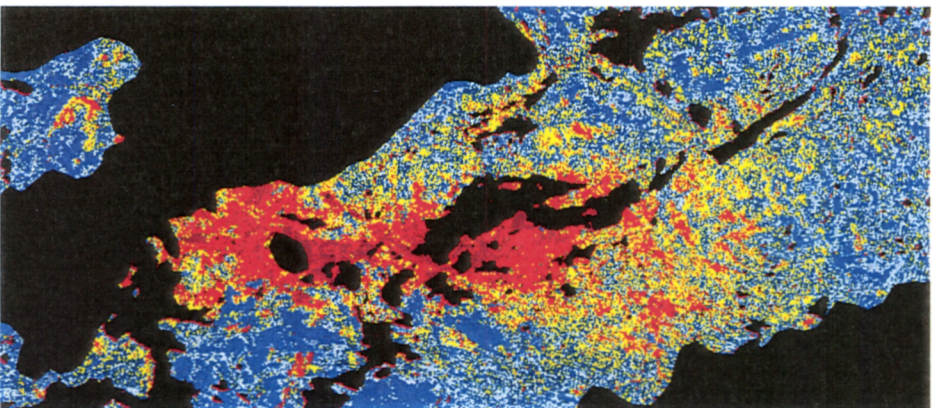
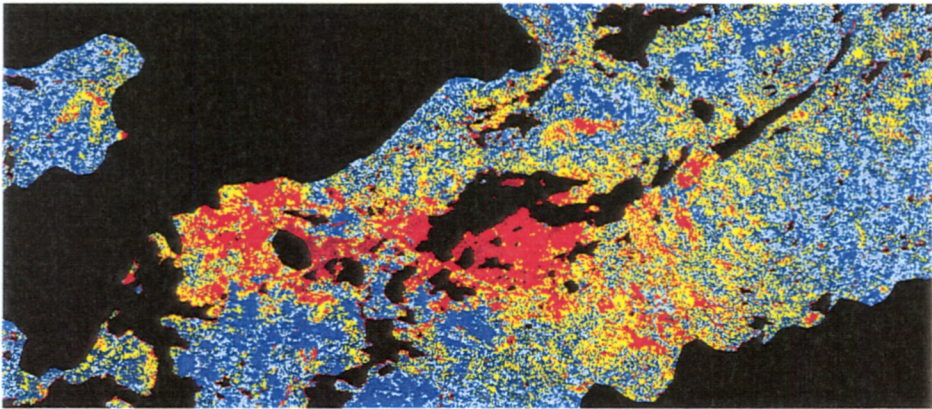
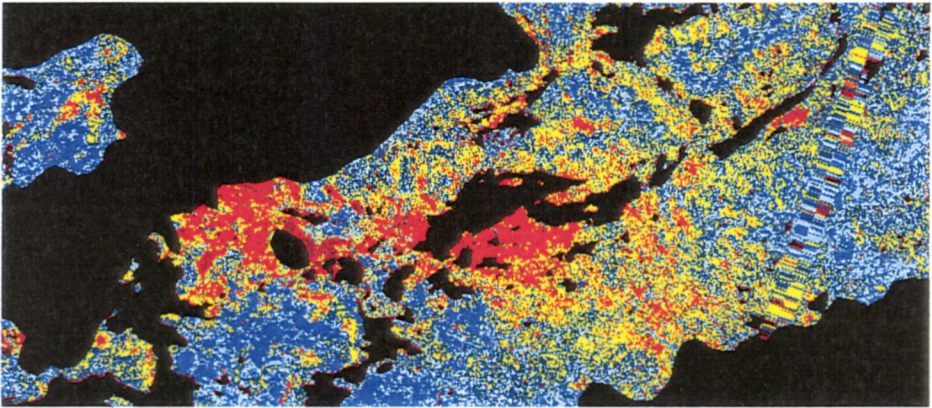
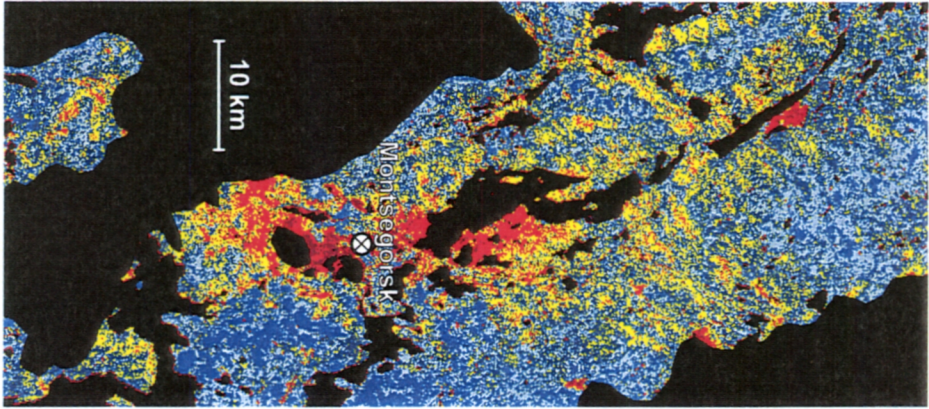
Violetti – täydellinen tuho
Punainen – vakava tuho
Keltainen – havupuuvaltainen
Sininen – lehtipuuvaltainen
Musta – pilvet, vedet ja avotunturit

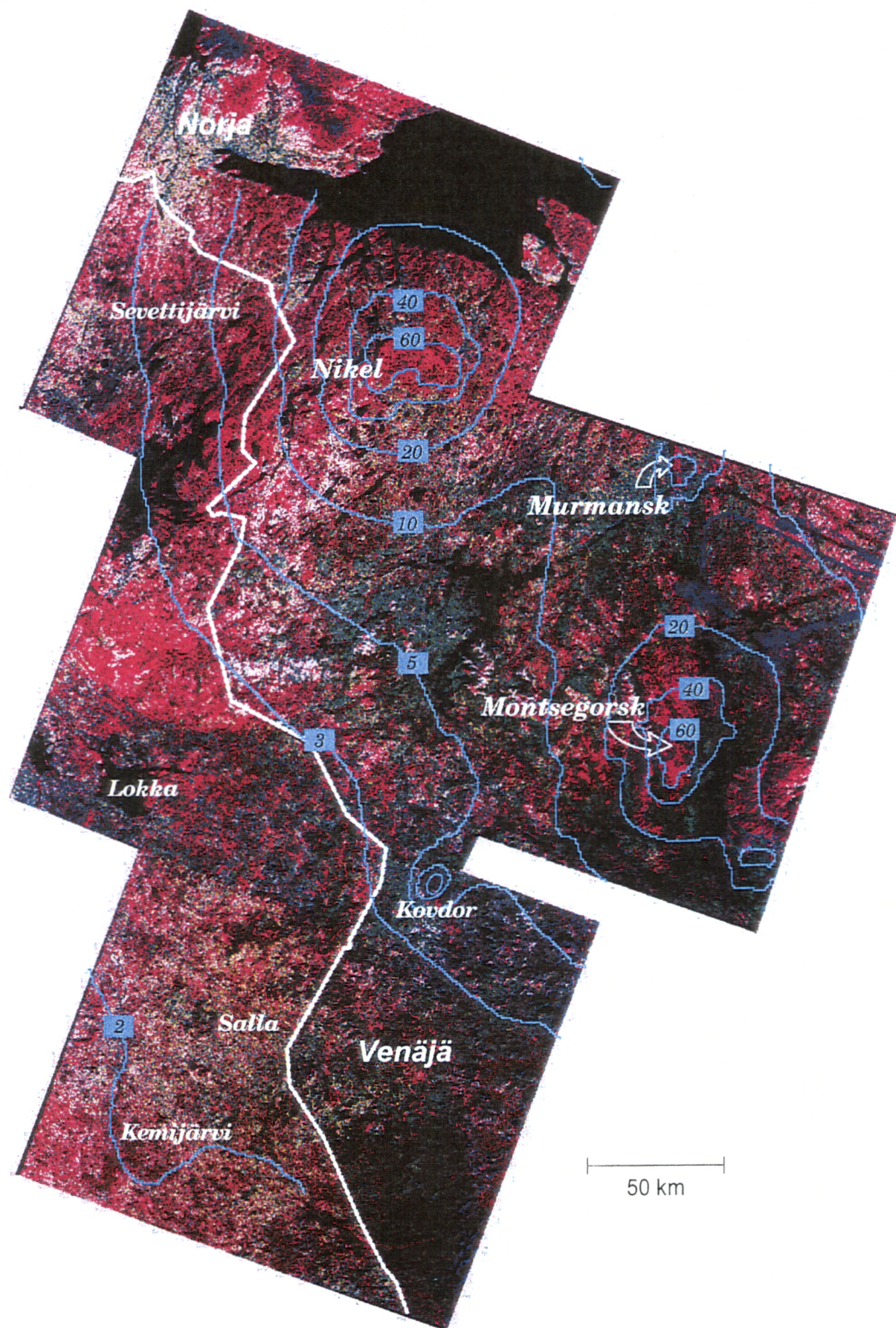
Taulu IV

Neljän Landsat TM-kuvan panoraama ja rikkidioksidin leviämismalli. Lukuarvot tarkoittavat rikkidioksidin pitoisuutta mikrogrammoina kuutiometrissä ilmaa. Väritys on saatu aikaan antamalla TM-sensorin kanaville 6, 4 ja 1 värit punainen, vihreä ja sininen.









Viimeisimmät Joensuun tutkimusasemalla ilmestyneet Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja -sarjan julkaisut:

- Nro 481 Timonen, M., Gustavsen, H.G., Ruotsalainen, K. & Timonen, T. 1993. Lapin suojametsäalueen pysyvät (SUOJAINKA) kokeet. Suunnitelmat, mittausohjeet ja aineiston kuvaus. 31 s. + liitteet.
- Nro 488 Sulonen, S. & Kangas, J. (toim.) 1994. Näkökohtia metsien monikäyttöön. Metsien monikäytön tutkimusohjelman tutkimuspäivä Espoossa 1993. 122 s.
- Nro 500 Toropainen, M. & Mäkkeli, P. (toim.). 1994. Metsäsektori myllerryksessä. Metsäntutkimuspäivä Joensuussa 1994. 62 s.
- Nro 504 Heinonen, J. 1994. Koealojen puu- ja puustotunnusten laskentaohjelma KPL. Käyttöohje. 80 s.
- Nro 568 Korhonen, K.T. & Mäkkeli, P. (toim.). 1995. Metsien eri käyttömuodot yhdistävä suunnittelu. Metsäntutkimuspäivä Joensuussa 1995. 67 s.
- Nro 569 Korhonen, K.T. 1995. Koepuutiedon käyttö inventointitulosten laskennassa. 29 s. + 4 osaliitettä.
- Nro 594 Parviainen, J., Tervo, L., Carneiro, J. & Soares, R. 1996. Establishment and management of tree plantations in southern Brazil. Finnish - Brazilian cooperation in forest research. 53 p.
- Nro 599 Finér, L., Leinonen, A. & Jauhiainen, J. (toim.). 1996. Puun ravinteet tuhkana takaisin metsään? Keski-Suomen ympäristökeskuksen ja Metsäntutkimuslaitoksen järjestämä tutkimusseminaari Jyväskylässä Ympäristökeskus Kammissa 14.3.1996. 65 s.
- Nro 607 Finér, L., Ilvesniemi, H., Kortelainen, P. & Karvinen, L. (toim.) 1996. Metsätalouden ympäristökuormitus - tutkijaseminaari Vääkssä Päijänne-luontokeskuksessa 20.-21.5.1996. 107 s.
- Nro 632 Verkasalo, E. 1997. Hieskoivun laatu vaneripuuna. 483 s. + liitteet 59 s.

METSÄNTUTKIMUSLAITOS
Joensuun tutkimusasema

Käyntiosoite: Yliopistokatu 7
Postiosoite: PL 68, 80101 Joensuu
Puhelin: (013) 251 4000 (ohivalinnat)
Telefax: (013) 251 4111

ISSN 0358-4283
ISBN 951-40-1576-2