



UNIVERSITY OF
EASTERN FINLAND

*Luonnontieteiden ja metsätieteiden
tiedekunta
Faculty of Science and Forestry*

SENTINEL-2- JA LANDSAT 8
-SATELLIITTIREFLEKTANSSITUOTTEIDEN VERTAILU JA
SOVELTAMINEN RUNKOTILAVUUDEN MALLINTAMISESSA

Joona Piispanen

METSÄTIETEIDEN PRO GRADU,
ERIKOISTUMISALA METSÄNARVIOINTI JA METSÄSUUNNITTELU

JOENSUU 2019

Piispanen, Joonas. 2019. Sentinel-2- ja Landsat 8 -satelliittirefleksanssitilavuuksien vertailu ja soveltaminen runkotilavuuden mallintamisessa. Itä-Suomen yliopisto, luonnontieteiden ja metsätieteiden tiedekunta, metsätieteiden osasto. Metsätieteen pro gradu, erikoistumisala metsänarviointi ja metsäsuunnittelu, 46 s.

TIIVISTELMÄ

Tavoitteena tutkimuksessa oli selvittää, kuinka paljon automaattisesti ilmakehäkorjattujen Sentinel-2- ja Landsat 8 -satelliittien heijastussuhteet eroavat toisistaan sekä selvittää syitä eroavuuteen. Tutkimuksessa tarkasteltiin lisäksi, parantaako näiden satelliittien yhteiskäyttö valtakunnallista laserkeilauspohjaista tilavuusmallia. Mallin toimivuutta arvioitiin myös käyttämällä satelliittikuvia, jotka oli korjattu aikaisemmassa tutkimuksessa luoduilla korjausmalleilla.

Aineistona tutkimuksessa oli laserkeilausdataa ja koelaitteilla mitattua metsävaratietoa. Näiden lisäksi aineistoon kuului myös Landsat 8-, Landsat 5- ja Sentinel-2 -satelliittien automaattisesti ilmakehäkorjattuja satelliittikuvia. Tutkimuksen menetelminä käytettiin tilastollisia tunnuksia, joiden avulla tutkittiin Sentinel-2 ja Landsat 8 heijastussuhteiden eroavuutta. Lisäksi menetelmänä käytettiin myös valtakunnallista tilavuusmallia.

Sentinel-2- ja Landsat 8 -satelliittien ilmakehäkorjattujen aineistojen välillä oli selvää eroa varsinkin näkyvän aallonpituuden kanavilla. Suurimmat erot satelliittien heijastussuhteiden välillä olivat sinisellä aallonpituuskanavalla. Pienimmät erot heijastussuhteissa saatiin lähi-infra-, SWIR 1- ja SWIR 2 -aallonpituuskanavilla. Sentinel-2- ja Landsat 8 -satelliittien heijastussuhteiden väliseen eroavaisuuteen on voinut vaikuttaa erot ilmakehäkorjausalgoritmeissa ja kuvissa olevat pilvet sekä satelliittien sensorien väliset erot.

Valtakunnallista tilavuusmallia paransi hieman joillakin kanavilla Sentinel-2- ja Landsat 8 -satelliittien yhteisaineiston käyttö, mutta muutos oli sen verran vähäistä, että tarkemman resoluution satelliittiaineistolla ei näytä olevan erityistä kohentavaa vaikutusta.

Aikaisemmassa tutkimuksessa luoduilla korjausmalleilla normalisoiduilla satelliittikuvilla saatiin lähes vastaava tulos valtakunnallisesta tilavuusmallista kuin tässä tutkimuksessa luoduilla korjausmalleilla korjatuilla satelliittikuvilla.

Avainsanat: Landsat 8, Sentinel-2, ilmakehäkorjaus, runkotilavuus, kaukokartoitus

Piispanen, Joonas. 2019. Comparison of Sentinel-2 and Landsat 8 -satellite reflectance products and application to stem volume modelling. University of Eastern Finland, Faculty of Science and Forestry, School of Forest Sciences. Master's thesis in Forest Science specialization Forest Mensuration and Forest Planning, 46 p.

ABSTRACT

The research objective was to find out how much do automatically atmospherically corrected Sentinel-2 and Landsat 8 -satellite reflectances differ from each other, and figure out reasons for the difference. The research objective also was to estimate whether the joint use of Sentinel-2 and Landsat 8 -satellite improves a national laser scanning based stem volume model. The performance of the model was also estimated using satellite images which were normalized using a correction model which had been applied in former research.

Research data included airborne scanning data and measurement data from forest plots. Atmospherically corrected Landsat 8, Landsat 5 and Sentinel-2 satellite images were also used. The research method included different statistical methods to study the difference between Sentinel-2 and Landsat 8 reflectances as well as the application of the national stem volume model.

There are differences between Sentinel-2 and Landsat 8-satellite atmospheric data sets. This difference was very clear in the visible wavelength bands. The biggest difference in reflectance could be identified in the blue wavelength band. The smallest difference between reflectances was in Near-infrared, SWIR 1 and SWIR 2 wavelength bands. Reasons for this difference between Sentinel-2 and Landsat 8 satellite reflectance could be attributed to the differences between atmospheric correction algorithms, the appearance of clouds in the images, and finally the differences between the satellite sensors.

The use of pooled Sentinel-2 and Landsat 8 satellite image bands as calibration variables had a minor positive effect on the national stem volume model for some of the bands. However, the impact was so small, that the use of higher resolution satellite data does not seem to add significant value to the model.

The correction model of normalized satellite images created for previous research produced almost the same result from national stem volume model than the correction models created for this study.

Key words: Landsat 8, Sentinel-2, atmospheric correction, stem volume, remote sensing

ALKUSANAT

Haluaisin kiittää Lauri Korhosta ja Eetu Kotivuorta työn loistavasta ohjauksesta. Haluaisin kiittää myös Suomen metsäkeskusta, Maanmittauslaitosta, Blom kartta Oy:ta, Terratec Oy:ta ja Arbonaut Oy:ta, joilta sain aineistoa tutkimukseeni.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	6
1.1 Kaukokartoitussatelliitit	6
1.1.1 Sentinel-2A- ja -2B -satelliitti	7
1.1.2 Landsat 8 -satelliitti.....	9
1.2 Tutkimuksen taustaa	11
1.3 Ilmakehäkorjaus.....	12
1.4 Tutkimuksen tavoitteet.....	14
2. AINEISTO.....	15
3. MENETELMÄT	19
3.1 Sentinel-2 -satelliitin ilmakehäkorjaus.....	19
3.2 Landsat 8 -satelliitin ilmakehäkorjaus	20
3.3 Aineiston prosessointi	22
4. TULOKSET.....	27
4.1 Satelliittikuvien heijastussuhteiden erot.....	27
4.2 Korjausmallit ja regressiokuvaajat.....	30
4.3 Valtakunnallisen tilavuusmallin kalibrointi	36
5. TULOSTEN TARKASTELU	37
5.1 Heijastussuhteiden erojen tarkastelu.....	37
5.2 Syitä heijastussuhteiden eroihin ja keinoja niiden vähentämiseen	39
5.3 Valtakunnallisen tilavuusmallin toimivuuden tarkastelua	40
6. JOHTOPÄÄTÖKSET	42
KIRJALLISUUS.....	43

1. JOHDANTO

Avaruudesta tapahtuvalla kaukokartoituksella on nykyään monia sovelluksia maailman laajuisesti, ja niillä on merkitystä sekä tutkimukselle että yksityisille yrityksille ja valtioille (Lillesand ym. 2015). Satelliittien käytöllä saadaan tärkeää tietoa maatalouden, metsätieteiden ja hallituksen tarpeisiin (Lillesand ym. 2015, Drusch ym. 2012).

Kun tarkastellaan suuria alueita, satelliittien käytössä tulee usein ongelmaksi, että kuvia ei saada samalta ajalta tai kuvat ovat huonolaatuisia pilvisyyden takia. Tällöin joudutaan hyödyntämään toista satelliittia. Nämä ajalliset ja paikalliset eroavaisuudet johtavat siihen, että satelliittikuviin tehdään ilmakehäkorjaus (Song ym. 2001). Viime vuosina on tullut mahdolliseksi ladata satelliittiaineistoa, joka on valmiiksi ilmakehäkorjattua. Esimerkiksi Sentinel-2- ja Landsat 8 -satelliiteista on saatavana ilmakehäkorjattua aineistoa (ESA 2015, USGS 2018). Kuitenkaan ei voida olla varmoja, että eri satelliiteille tehdyt automaattiset ilmakehäkorjaukset toimisivat samalla tavalla.

1.1 Kaukokartoitussatelliitit

Satelliitteja käytetään nykyään laajasti erilaisissa sovelluksissa, kuten maankäytön suunnittelussa, vesien hallinnassa ja luonnonkatastrofeihin varautumisessa (Lillesand ym. 2015, ESA 2015, USGS 2016). Se on mahdollistanut ymmärtämään sekä luonnon ihmeitä että prosesseja, jotka toimivat maapallollamme, mutta myös ihmiskunnan vaikutuksia hauraaseen luontoon (Lillesand ym. 2015).

Satelliittikuva-aineistoa voidaan hyödyntää myös lisäselittäjänä erilaisissa malleissa, kuten valtakunnallisessa runkotilavuusmallissa (Kotivuori ym. 2018). Kotivuori ym. (2018) käyttivät tutkimuksessaan esimerkiksi MODIS-sensorin aallonpituuskanavia ja laserkeilausmuuttujia puuston tilavuuden ennustamiseen mallin avulla. Heiskanen ym. (2011) käyttivät taas tutkimuksessaan satelliittikuva-aineistoa metsän heijastusmallissa lehtialaindeksin määrittämiseen.

Satelliitit voidaan jakaa niiden sensoreiden perusteella kahteen luokkaan, passiivisiin ja aktiivisiin satelliitteihin (Chuvieco 2016). Passiiviset sensorit keräävät vain kohteen lähettämää säteilyä, kun taas aktiiviset sensorit lähettävät omaa säteilyä, jonka heijastumista kohteesta takaisin sensoriin mitataan (Chuvieco 2016). Passiivinen satelliitti on esimerkiksi Sentinel-2 -satelliitti, kun RADARSAT-1 -satelliitti edustaa taas aktiivisia satelliitteja (ESA 2015, Chuvieco

2016). Satelliitit voidaan jaotella myös meteorologisiin (esimerkiksi MetSat-satelliitti) ja ei-meteorologisiin satelliitteihin (esimerkiksi Landsat 7 -satelliitti) (Cracknell & Hayes 2007).

Satelliittien spatiaalinen resoluutio (pienin kohde, joka on mahdollista havaita kuvalta) vaikuttaa merkittävästi, mihin käyttötarkoitukseen satelliittia pystytään hyödyntämään (Chuvieco 2016). Keskiresoluution satelliitteja, kuten Sentinel-2:ta (resoluutio 10–60 m), voidaan hyödyntää esimerkiksi maanviljelyksen apuna, mutta korkean resoluution satelliitti IKONOS:ta (0,82–4 m) voidaan hyödyntää korvaamaan ilmakuvia (ESA 2015, Cracknell & Hayes 2007, GeoEye 2006). Matalan resoluution satelliittia NOAA-19 (resoluutio 1,1 km) hyödynnetään taas esimerkiksi meteorologiassa (OSCAR 2019a, OSCAR 2019b).

Vuonna 1967 käynnistyneellä Landsat-ohjelmalla on edelleen merkitystä joko välillisesti tai suoraan satelliittien kaukokartoituksen teknologiaan liittyviin tuloksiin. Tämä ohjelma oli ensimmäinen siviilitutkimukseen tarkoitettu satelliittiohjelma, jonka tarkoituksena oli kartoittaa maavaroja. Tällä hetkellä satelliittikaukokartoitus on hyvin kansainvälistä ja monissa maissa kehitetään ja otetaan käyttöön uusia järjestelmiä. (Lillesand ym. 2015)

Nykyään avaruuskaukokartoituksessa täydennetään tai täysin korvataan useilla pienillä satelliiteilla yksittäisiä isompia satelliittijärjestelmiä. Näillä pienillä satelliiteilla on monia etuja verrattuna isompiin satelliitteihin. Ne vaativat esimerkiksi vähemmän insinöörisuunnittelua ja niiden valmistuskustannukset ovat pienemmät. Niiden etuna on myös, että ne voidaan kuljettaa avaruuteen toisten avaruuslaukaisujen mukana, ja siten säästää laukaisukustannuksia. (Lillesand ym. 2015)

1.1.1 Sentinel-2A- ja -2B -satelliitti

Sentinel-2A ja -2B ovat identtisiä satelliitteja, joiden tarkoituksena on tarjota satelliittikuvadataa esimerkiksi maatalouden ja metsätalouden riskien kartoitukseen ja luonnonkatastrofien hallintaan (Drusch ym. 2012, ESA 2015). Sentinel-2A laukaistiin 23.6.2015 ja Sentinel-2B 7.3.2017 (ESA 2019). Satelliittien eliniäksi on arvioitu 7.25 vuotta (Drusch ym. 2012). Polttoaineen ja patterien on kuitenkin suunniteltu kestävän 12 vuotta (ESA 2015).

Sentinel-2 -satelliitit ovat varustettu laitteistolla, joka on korkearesoluutioinen, keilausalueeltaan laaja ja kykenee monikanavakuvaukseen (Drusch ym. 2012). Kummatkin satelliitit kiertä-

vät samaa aurinkosynkronista kiertorataa 180 asteen etäisyydellä toisistaan ylittäen kuvauskohteen noin kello 10:30 (ESA 2015). Ne kiertävät aurinkosynkronista kiertorataa, jotta maan pinnalle tuleva auringon säteilykulma pysyisi vakiona (ESA 2015). Satelliittien yhteinen kiertoaika on 5 päivää, kun yksittäisen satelliitin kiertoaika on 10 päivää (ESA 2015). Kuvassa 1 näkyy Sentinel-2 -satelliitti.



Kuva 1. Sentinel-2 -satelliitti. (ESA 2015)

Sentinel-2 -satelliiteissa on 13 aallonpituuskanavaa (Taulukko 1). Näistä 4 kanavaa on 10 m:n, 6 kanavaa on 20 m:n ja 3 kanavaa on 60 m:n resoluutiolla (ESA 2015). Satelliitin keilausalueen leveys on 290 km ja ne lentävät keskimäärin 786 km:n korkeudessa (Drusch ym. 2012). Paikan määrittäminen satelliitissa tapahtuu Global Navigation Satellite System (GNSS) -vastaanottimen avulla (ESA 2015).

Taulukko 1. Sentinel-2 kanavat, aallonpituudet ja resoluutiot.

Sentinel-2 kanavat	Keskimääräinen aallonpituus (μm)	Resoluutio (m)
Kanava 1 - Rannikko/aerosoli	443	60
Kanava 2 - Sininen	490	10
Kanava 3 - Vihreä	560	10
Kanava 4 - Punainen	665	10
Kanava 5 - Kulminaatio 1	705	20
Kanava 6 - Kulminaatio 2	740	20
Kanava 7 - Kulminaatio 3	783	20
Kanava 8 - Lähi-infra (NIR)	842	10
Kanava 8a - Kapea lähi-infra (Narrow NIR)	865	20
Kanava 9 - Vesihöyry (Water vapour)	940	60
Kanava 10 - Cirrus	1375	60
Kanava 11 - Keski-infrapuna (SWIR 1)	1610	20
Kanava 12 - Keski-infrapuna (SWIR 2)	2190	20

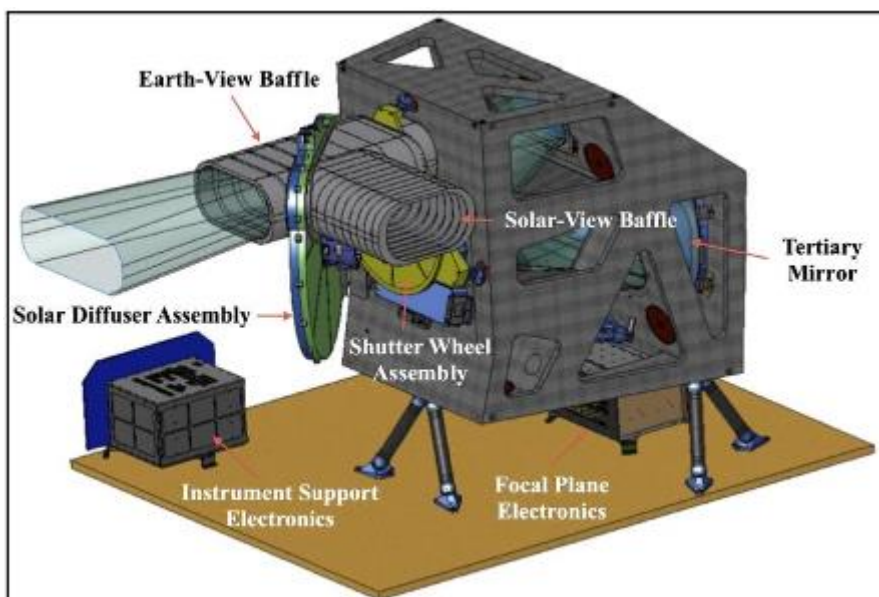
1.1.2 Landsat 8 -satelliitti

Landsat 8 -satelliitti laukaistiin 11.2.2013. Sen tarkoituksena on tarjota korkealaatuisia näkyvän ja infrapunaa satelliittikuvia. Lisäksi se laajentaa olemassa olevaa Landsat-satelliittiaineistoa ja turvaa aineiston saantia myös tulevaisuudessa. (Lillesand ym. 2015, USGS 2016) Landsat 8 mahdollistaa maailmanlaajuisen korkean resoluution multispektraalin datan saatavuuden tuottaen noin 650 kuvaa päivässä (USGS 2016). Se kiertää koko maapallon pinnan 16 päivän sykleissä (USGS 2016). Landsat 8 -satelliitin optisille laiteille vähimmäiseliniäksi on suunniteltu 5 vuotta ja lämpökomponenteille (thermal component) vastaavasti 3 vuotta (Lillesand ym. 2015). Polttoainetta satelliitilla on kuitenkin suunniteltu riittävän vähintään 10 vuodeksi (Lillesand ym. 2015). Landsat 8 on siis polttoainetilanteen osalta melkein elinkaarensa puolivälissä.

Satelliitti on valmistettu Yhdysvaltojen avaruusjärjestön (National Aeronautics and Space Administration, NASA) ja Yhdysvaltojen geologisen tutkimuskeskuksen (United States Geological Survey, USGS) yhteistyönä. NASA vastasi projektissa satelliitin valmistuksesta, laukaisusta ja kalibroinnista, kun taas USGS vastasi maasysteemien kehittämisestä sekä laukaisun jälkeen datan vastaanottamisesta ja jakamisesta. Landsat 8 kiertää 705 km korkeudessa lähes pyöreää, lähes polaarista ja aurinkosynkronista kiertorataa, joka toiminnallisesti vastaa samaa kiertorataa kuin mitä Landsat 4, 5 ja 7 hyödyntävät. (Lillesand ym. 2015)

Landsat 8 on varustettu Operational Land Imager (OLI) ja Thermal infrared sensor (TIRS) -sensoreilla (Lillesand ym. 2015). Nämä sensorit kuvaavat samanaikaisesti 15 asteen kulmassa ja tuottavat dataa, joka tallennetaan välittömästi ja siirretään x-kanavan avulla useisiin maassa oleviin vastaanottoasemiin (Lillesand ym. 2015). Aineisto tulee sensoreista 12-bittisenä datana, joka korjataan radiometrisesti ja muutetaan UTM kartografiseen projektioon WGS84 tai napal alueilla Polar Stereographic -projektioon (Lillesand ym. 2015, USGS 2016). Tästä muodostuu ortokorjattu Geotiff-muodossa oleva Level-1T -tuote (Lillesand ym. 2015).

OLI- ja TIRS -sensorit hyödyntävät teknologiaa, jota ei ole ennen käytetty Landsat-ohjelmassa. Kummatkin sensorit käyttävät linjaskanneriteknologiaa sekä linjageometriaskanneri keilausta (Lillesand ym. 2015). Linjageometriaskanneriteknologiassa koko kaista kuvataan kerralla. Tämä mahdollistaa sen, ettei sensorissa tarvitse olla liikkuvia osia (NASA 2017). Se mahdollistaa myös sen, että sensorin tunnistimella on pidempi käsittelyaika (dwell time) (NASA 2017). Kuvassa 2 Landsat 8 -satelliitin Operational Land Imager (OLI) -sensori.



Kuva 2. Landsat 8 -satelliitin OLI-sensori. (USGS 2016)

OLI -sensorissa on 8 lyhyen aallonpituuden kanavaa, jotka ovat resoluutioltaan 30 m ja yksi pankromaattinen kanava 15 m resoluutiolla (USGS 2016). Lisäksi TIRS-sensorissa on kaksi kanavaa 100 m resoluutiolla (Lillesand ym. 2015). Taulukossa 2 on esitetty Landsat 8 -satelliitin kanavat sekä niiden aallonpituudet että resoluutio.

Taulukko 2. Landsat 8 -satelliitin kanavat, aallonpituudet ja resoluutiot.

Landsat 8 kanavat	Aallonpituus (μm)	Resoluutio (m)
Kanava 1 - Rannikko/aerosoli	433–453	30
Kanava 2 - Sininen	450–515	30
Kanava 3 - Vihreä	525–600	30
Kanava 4 - Punainen	630–680	30
Kanava 5 - Lähi-infra (NIR)	845–885	30
Kanava 6 – Keski-infrapuna (SWIR 1)	1560–1660	30
Kanava 7 – Keski-infrapuna (SWIR 2)	2100–2300	30
Kanava 8 - Pankromaattinen	500–680	15
Kanava 9 - Cirrus	1360–1390	30
Kanava 10 - Lämpö infrapuna (TIR)	10600–11190	100
Kanava 11 - Lämpö infrapuna (TIR)	11500–12510	100

1.2 Tutkimuksen taustaa

Korhonen ym. (2017) tutkimuksessa huomattiin ilmakehäkorjattujen Sentinel-2- ja Landsat 8 -satelliittien heijastussuhteiden eroavan toisistaan tietyillä aallonpituuskanavilla selvästi. Tutkimuksessa epäiltiin eroavaisuuksien johtuvan joko satelliittien sensorien eroavaisuuksista tai automaattisista ilmakehäkorjauksista.

Näiden Sentinel-2 ja Landsat 8 välistä eroavaisuutta havaitsivat myös van der Werff ja van der Meer (2016) tutkimuksessaan, jossa he vertasivat näillä satelliiteilla tehtyä normalisoitua kasvillisuusindeksiä (NDVI). Tässä tutkimuksessa Sentinel-2 -satelliitti sai korkeamman NDVI-arvon kuin Landsat 8 -satelliitti, mutta näiden välinen korrelaatio oli kuitenkin 0,85.

Eroavaisuutta Sentinel-2- ja Landsat 8 -satelliittien välillä saivat myös Vuolo ym. (2016) tutkimuksessaan, jossa havaittiin alhaisempaa heijastussuhdetta Sentinel-2 -kuvan satunnaisesti valituille pikseleille verrattuna Landsat 8 -kuvan pikseleihin.

Li ym. (2018) vertasivat tutkimuksessaan Sentinel-2 ilmakehäkorjattua tuotetta Landsat 8- ja Terra/Aqua MODIS -satelliittien ilmakehäkorjattuihin tuotteisiin, saaden Sentinel-2 ja Landsat 8 välille rannikollinen/aerosoli (coastal/aerosol) kanavalle 0,475 korrelaation ja muille kuudelle kanavalle 0,632–0,905 korrelaatiot. Terra/Aqua MODIS- ja Sentinel-2 -satelliittien väliset korrelaatiot tutkimuksessa kanaville olivat 0,551–0,736. (Li ym. 2018) Tässä tutkimuksessa MODIS-sensori- tai MODIS -termillä tarkoitetaan Terra- ja Aqua -satelliittien MODIS-sensoreja.

Landsat 8- ja Sentinel-2 -satelliittien ilmakehän korjaamattomien aineistojen eli ilmakehän yläpuolisten heijastusten välistä eroavaisuutta ovat tutkineet Li ym. (2017). Tutkimuksessa saatiin selville, että kanavien spektrinen ero oli alle 3 % kaikilla muilla paitsi NIR- ja Cirrus -kanavalla, joiden spektrinen ero oli 8 % ja 15 % (Li ym. 2017). Landsat 8- ja Sentinel-2 satelliittien sensorien välille sai pieniä eroja myös Flood (2017) tutkimuksessaan, jossa hän vertasi samalla ilmakehäkorjausalgoritmillä korjattuja aineistoja toisiinsa. Näiden kahden tutkimuksen perusteella voidaan olettaa, että kaikkien yllä olevien tutkimuksien heijastussuhde-erot Sentinel-2- ja Landsat 8 -satelliittien kanavien välillä täytyy johtua myös ilmakehäkorjauksesta.

Sentinel-2 -satelliitin Sen2Cor-ilmakehäkorjauksen laatua on arvioinut Li ym. (2018) tutkimuksessaan, jossa hän vertasi Sentinel-2 -kuvia, jotka olivat korjattu Sen2cor-ilmakehäkorjauksella sekä 6SV-säteilyn siirtokoodilla. Aineistona oli käytetty AERONET AOT- ja AERONET VW

-tuotteita. 6SV-koodilla korjatut kuvat edustivat maanpäällistä todellista heijastussuhdetta. Tutkimuksessa käytettiin todellisen heijastussuhteen määrittämiseen 6SV-koodia ja pintamittauksia (surface measurement), koska maanpinnan heijastuksen määrittäminen suurille alueille spektrometrillä on työlästä. Tutkimuksessa saatiin Sen2Corilla tuotetun ilmakehän optisen tiheyden (AOT) ja AERONET:n ilmakehän optisen tiheyden (AOT) väliseksi korrelaatioksi vain 0,419. Kuitenkin tutkimuksessa saatiin Sen2Corilla tuotetun vesihöyryn (VW) ja AERONET:n vesihöyryn välille parempi korrelaatio, sen ollessa 0,945. Sen2Corilla tuotettu vesihöyry oli kuitenkin aliarvio (−17,7 %) verrattuna referenssiaineistoon. Tutkimuksessa Sentinel-2 -satelliitin yhdeksännelle aallonpituuskanavalle Sen2Cor ja 6SV ilmakehäkorjauksien välinen korrelaatio oli 0,749 ja muille yhdelletoista kanavalle 0,843–0,998. (Li ym. 2018)

Claverie ym. (2018) tekivät Sentinel-2- ja Landsat 8 -satelliittien aineistosta yhdistetyn aineiston, jotta molempien satelliittien aineistoa voitaisiin käyttää yhdessä ja saada siten satelliittiaineiston toisto aika suuremmaksi. Tässä yhdistämisessä he käyttivät molempien satelliittien ilmakehäkorjauksessa Landsat 8 -satelliitille alun perin suunniteltua Land Surface Reflectance Code (LaSRC) -algoritmia. He saivat hyviä tuloksia verrattaessa luotua yhdistettyä aineistoa MODIS MCD09CMG -tuotteeseen.

1.3 Ilmakehäkorjaus

Ilmakehäkorjauksella tarkoitetaan prosessia, jossa satelliittikuvan spektrinen raaka data muutetaan siten, että siitä poistetaan ilmakehän hajonnan ja absorption aiheuttama vaikutus (Lillesand ym. 2015). Ilmakehäkorjauksella ei kuitenkaan saada luotua täydellisesti samanlaista spektristä dataa kuin miten se on havaittu maanpinnalla. Se on kuitenkin riittävän lähellä todellista arvoa, jotta dataa voidaan hyödyntää monenlaisissa analyyseissa. (Lillesand ym. 2015)

Riippuen sovelluksesta ilmakehäkorjaus voi olla joko absoluuttinen tai suhteellinen. Absoluutisessa ilmakehäkorjauksessa digitaaliset numeroarvot (digital number) muutetaan maanpinnan heijastussuhteeksi. Relatiivisessa ilmakehäkorjauksessa samat digitaaliset numeroarvot muutetaan heijastussuhteeksi, jonka oletetaan olevan sama kuin maan päällä. (Chavez & Mackinnon 1994)

Ilmakehäkorjauksen tarpeellisuus riippuu kaukokartoitus- ja ilmakehäaineistojen saatavuudesta, halutusta informaatiosta ja analyyttisistä metodeista (Song ym. 2001). Usein ilmakehäkorjausta tarvitaan sekä luokittelussa että muutoksen tulkinnessa silloin, kun tutkimusaineisto

koostuu eri maantieteellisistä paikoista tai eri aikoina hankitusta aineistosta (Song ym. 2001). Joissakin tapauksissa ilmakehäkorjaus on kuitenkin välttämätöntä tehdä, esimerkiksi tarkasteltaessa suuria alueita (Song ym. 2001). Myös monille latvumalleille ilmakehäkorjaus on hyvin tärkeä toimenpide, koska malleissa hyödynnetään latvuksen biofysikaalisia parametrejä, jotka perustuvat maanpinnan heijastussuhteeseen (Liang 2004). Song ym. (2001) tutkimuksessa havaittiin, että kaikki käytetyt ilmakehäkorjausmenetelmät paransivat muutoksen tulkinnan ja luokittelun tarkkuutta.

Ilmakehäkorjausmenetelmät voidaan jakaa kahteen luokkaan. Luokittelu perustuu siihen, hyödynetäänkö korjaus pelkästään kuvasta saatavia tietoja vai käytetäänkö korjauksessa myös ulkopuolisia tietoja, kuten kuvaushetkellä vallinneita ilmakehän ominaisuustietoja. (Song ym. 2001)

Säteilyn siirtokoodit ovat yksi ilmakehän korjausmenetelmistä, jotka vaativat myös kuvan ulkopuolisia tietoja (Song ym. 2001). Niiden avulla simuloidaan energian kulkemista ilmakehässä, ja niistä on tänä päivänä tulossa pääasiassa käytetty menetelmä korvaamaan empiirisiä menetelmiä (Kotchenova ym. 2008).

Satelliittikuvien ilmakehäkorjaukseen on kehitetty monia erilaisia säteilyn siirtokoodia (radiative transfer code) (Kneizys ym. 1980, Haan ym. 1991, Vermote ym. 1997, Mayer & Kylling 2005, Berk ym. 1998). Näiden avulla on saatu satelliittikuvien heijastussuhde vastaamaan lähelle maanpinnalla havaittavaa heijastussuhdetta (Holm ym. 1989, Moran ym. 1992). Säteilyn siirtokoodien ongelmana on kuitenkin se, että ne vaativat tarkat tiedot ilmakehän optisista ominaisuuksista kuvaushetkellä (Song ym. 2001). Näiden tietojen saaminen ei ole aina mahdollista tai tietojen laatu on liian heikkoa (Song ym. 2001). Tämän takia säteilyn siirtokoodia on ajoittain vaikea hyödyntää korjaamaan ilmakehän vaikutusta satelliittikuvista (Song ym. 2001).

Tumman kohteen vähennys on absoluuttinen ilmakehän korjausmenetelmä, joka hyödyntää vain itse kuvasta saatavia tietoja (Chavez 1996, Song ym. 2001). Menetelmän ideana on hyödyntää kuvassa olevia tummia kohteita, joiden heijastussuhde on siis nolla tai lähellä sitä (Song ym. 2001). Täten tiedetään, että näiden tummien kohteiden pienin digitaalinen numeroarvo johtuu ilmakehän vaikutuksesta ja, siten vähentämällä se kaikista pikseleistä saadaan lopputuloksena ilmakehäkoryttu kuva (Chavez 1989).

Muita menetelmiä on esimerkiksi tiheän tumma kasvillisuus (dense dark vegetation eli DDV) -menetelmä, jossa pyritään sinisellä ja punaisella kanavalla havaitsemaan tummia maanpinnan-kohteita (Kaufman ym. 1997). Menetelmällä saatuja tietoja voidaan hyödyntää säteilyn siirto-koodeissa korjaamaan satelliittikuvia (Song ym. 2001). Sentinel-2 -satelliitin ilmakehäkorjaus hyödyntää myös tätä tiheän tumma kasvillisuus -menetelmää (ESA 2015).

Relatiivisissa ilmakehän korjausmenetelmissä hyödynnetään kuvan kanavien ja ajan välistä lineaarista suhdetta (Song ym. 2001). Tarkoituksena menetelmässä on määrittää lineaarinen suhde radiometrisin mittauksin kohteista, jotka ovat radiometrisesti vakaita ja joiden sijainti on tiedossa (Song ym. 2001). Näitä kohteita kutsutaan nimellä pseudo-invariant features eli PIF. Coppin ja Bauer 1994 hyödynsivät tätä menetelmää tutkiessaan metsän peittävyuden muutoksia. He normalisoivat Landsat Tm -kuvat käyttämällä kohdepintoina syvää karua järveä, tasaista asfalttipintaa sekä tiheää, varttunutta tasaikäistä ja homogeenista amerikanpunamänty (*Pinus resinosa*) metsää että sorapeitteistä aluetta ja betonista lentokoneiden pysäköintialuetta.

Radiometrisessä normalisoinnissa on tarkoitus korjata eri lähteistä tai ajalta olevat satelliittikuvat vastaamaan toisiaan. Normalisointi vaatii sen, että satelliittikuvat menevät ainakin osittain päällekkäin. Normalisointi voidaan suorittaa luomalla lineaarinen regressiomalli siten, että korjattavan satelliittikuvan heijastussuhteita selitetään toisen satelliittikuvan heijastussuhteilla. Tämän jälkeen korjattavan satelliittikuvan jokainen heijastussuhde normalisoidaan luodulla regressiomallilla. (Lillesand ym. 2015)

Radiometristä normalisointia voidaan käyttää myös ilmakehäkorjauksen vaihtoehtona, kun halutaan tarkastella eri aikoina otettuja satelliittikuvia (Lillesand ym. 2015).

1.4 Tutkimuksen tavoitteet

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on saada selville, kuinka paljon automaattisesti ilmakehäkorjattujen Sentinel-2- (S2) ja Landsat 8 (L8) -satelliittien heijastussuhteet poikkeavat toisistaan sekä saada selville syyt heijastussuhteiden poikkeavuuteen. Tutkimuksen tarkoituksena on myös tarkastella, parantaako Landsat 8- ja Sentinel-2 -satelliittien yhteiskäyttö valtakunnallisen tilavuusmallin tarkkuutta. Näiden lisäksi tavoitteena on arvioida Zhangin ym. (2018) tutkimuksessa luotujen korjausmallien toimivuutta verrattuna tässä tutkimuksessa luotuihin korjausmallihin.

Tutkimus on jaettu kolmeen vaiheeseen:

1. Tarkastellaan Landsat 8- ja Sentinel-2 -satelliittien ilmakehäkorjattujen heijastussuhteiden välistä eroavuutta tilastollisten tunnusten avulla.
2. Luodaan ensimmäisessä vaiheessa parhaat tulokset saaneiden kuvaparien perusteella kanavakohtaiset regressiomallit ja normalisoidaan Landsat 8 -satelliittikuvakanavat näiden mallien perusteella sekä käyttämällä Zhangin ym. (2018) tutkimuksessa luotuja malleja. Näistä ensimmäisen vaiheen parhaista kuvapareista luodaan myös regressiokuvaajat.
3. Testataan toisessa vaiheessa normalisoitujen Landsat 8 -satelliittikuvien ja Sentinel-2 -kuvien yhteiskäytön toimivuutta Kotivuoren ym. (2018) valtakunnallisten mallien kalibroinnissa.

2. AINEISTO

Tutkimuksessa käytettiin osittain samaa aineistoa kuin Kotivuoren ym. (2018) tutkimuksessa. Tähän aineistoon kuului 22 aluetta ympäri Suomea. Jokaisen alueen koealoilta oli koordinaatit ETRS-TM35FIN -koordinaattijärjestelmässä ja tilavuudet puulajeittain sekä laserkeilausmuutujat (havg_F ja h95_L). Tämän lisäksi oli MODIS-satelliittikuvan kanavien heijastussuhteita sekä heijastussuhteista laskettuja tunnuksia. Koealojen maastotiedot oli saatu Suomen metsäkeskukselta, Blom kartta Oy:ltä ja Terratec Oy:ltä. Laserkeilausaineisto oli saatu samoista lähteistä kuin maastotiedot, mutta näiden lisäksi osa laserkeilausdatasta oli Arbonaut Oy:ltä ja Maanmittauslaitokselta. MODIS -aineisto oli taas ladattu NASA Land Processes Distributed Active Archive Center- ja USGS -verkkosivustoista.

Näiden aineistojen lisäksi käytettiin muita aineistoja, jotka on esitetty alla siten, että kunkin tutkimusosan vaiheen aineisto on omana kappaleenaan. Kuvassa 3 näkyy käytetyt alueet siten, että alueen paikaksi on merkitty alueen keskimmäisin koeala. Tämän takia merkityt kohteet eivät osu täysin siihen kohtaan missä kaupunki/kylä sijaitsee.



Kuva 3. Tutkimuksessa käytetyt alueet merkittynä alueen keskimmäisimmällä koealalla.

Vaiheessa 1 aineistona käytettiin Landsat 8- ja Sentinel-2 -satelliittikuvia, jotka olivat Savukosken, Kristiinankaupungin ja Oriveden alueelta (taulukko 1). Jokaiselta alueelta oli kolme Landsat 8- ja Sentinel-2 -kuvaparia. Kuvaparit oli valittu sillä perusteella, että kuvausajat olisivat mahdollisimman lähellä toisiaan ja kuvat olisivat mahdollisimman vähäpilvisiä sekä koealat osuisivat mahdollisimman hyvin kuville.

Taulukko 1. Ensimmäisen vaiheen vertailut kuvaparit.

Paikka	Päivä L8	Päivä S2
Kristiinankaupunki	18.8.2015	20.8.2015
Kristiinankaupunki	18.8.2015	23.8.2015
Kristiinankaupunki	26.7.2016	25.7.2016
Orivesi	3.7.2015	17.8.2015
Orivesi	20.8.2015	20.8.2015
Orivesi	15.7.2017	30.6.2017
Savukoski	18.8.2015	17.8.2015
Savukoski	20.8.2015	20.8.2015
Savukoski	5.7.2016	22.7.2016

Taulukossa 2 on esitetty tutkimuksessa käytettyjen koealojen määrä alueittain. Taulukossa on myös keskimääräiset tilavuudet alueittain sekä pienin ja suurin tilavuus jokaiselta alueelta.

Taulukko 2. Ensimmäisen ja kolmannen vaiheen koealojen määrät sekä kolmannen vaiheen alueiden keskimääräiset tilavuudet ja niiden minimi- ja maksimiarvot.

Paikkakunta	Koealojen pienin ja suurin määrä vaihe 1	Koealojen määrä vaihe 3	Keskimääräinen tilavuus m ³ /ha	Pienin ja suurin tilavuus m ³ /ha
Savukoski	149-232	233	71,02	9,09–339,06
Sodankylä		299	86,66	3,27–426,83
Kolari		296	100,31	4,24–462,08
Kuusamo		301	91,97	4,84–482,77
Ranua		270	97,56	3,04–412,70
Tornio		299	98,30	3,02–488,47
Pudasjärvi		301	109,41	4,66–513,64
Kuhmo		301	127,48	5,78–552,45
Siikalatva		290	114,02	7,00–437,78
Toholampi		297	108,60	5,89–444,41
Maaninka		283	157,16	3,7–604,66
Kaavi		301	148,36	3,48–663,44
Ilomantsi		149	213,78	21,00–511,55
Ähtäri		294	136,84	3,16–548,77
Kristiinankaupunki	208-299	301	149,79	4,25–899,09
Kangasniemi		293	178,94	4,64–754,39
Sulkava		301	175,34	5,23–591,30
Orivesi	210-301	297	192,56	4,16–768,16
Sastamala		301	185,99	6,85–701,82
Virolahti		301	186,26	3,74–812,65
Hyvinkää		285	178,47	3,78–924,04
Turku		296	184,22	4,96–607,62

Vaiheessa 2 jokaiselta 22 tutkimusalueelta valittiin mahdollisimman vähäpilvinen kuva, jonka kuvauspäivämäärä oli lähellä alueen koealan mittauspäivämääriä (Taulukko 4). Aineistona käytettiin myös vaiheen 1 kuvapareja, joiden heijastussuhteet olivat mahdollisimman lähellä toisiinsa, että jokaiselta alueelta tuli vähintään yksi kuvapari. Käytetyt kuvat ovat taulukossa 3.

Taulukko 3. Mallien luonnissa käytetyt kuvaparit.

Paikka	Päivä L8	Päivä S2
Kristiinankaupunki	18.8.2015	23.8.2015
Orivesi	3.7.2015	17.8.2015
Orivesi	20.8.2015	20.8.2015
Savukoski	18.8.2015	17.8.2015
Savukoski	20.8.2015	20.8.2015

Taulukko 4. Valtakunnallisen tilavuusmallin kalibroinnissa käytetyt kuvat.

Paikkakunta	Satelliitti	Päivä	Mittauspäivämäärät
Savukoski	Sentinel-2	20.8.2015	9.7.–21.8.2015
Sodankylä	Landsat 8	20.8.2015	16.8.–23.8.2015
Kolari	Landsat 8	3.6.2014	07.6.–06.8.2013
Kuusamo	Landsat 8	25.7.2014	01.7.–23.7.2014
Ranua	Landsat 8	30.8.2013	04.7.–24.8.2012
Tornio	Landsat 8	18.8.2015	13.6.–4.08.2013
Pudasjärvi	Sentinel-2	17.8.2015	11.8.–19.8.2015
Kuhmo	Landsat 8	22.8.2015	3.06.–8.08.2014
Siikalatva	Landsat 8	23.7.2014	12.6.–20.6.2013
Toholampi	Landsat 8	21.8.2013	28.6.–03.7.2012
Maaninka	Sentinel-2	17.8.2015	1.7.–7.08.2015
Kaavi	Landsat 8	22.8.2015	23.7.–30.7.2014
Ilomantsi	Landsat 8	22.6.2013	19.06.–3.7.2013
Ähtäri	Landsat 8	20.8.2015	28.6.–27.8.2013
Kristiinankaupunki	Sentinel-2	23.8.2015	28.6.–2.7.2015
Kangasniemi	Landsat 8	3.7.2015	2.7.–13.7.2013
Sulkava	Landsat 5	8.6.2011	31.7.–4.9.2011
Orivesi	Sentinel-2	20.8.2015	1.7.–3.7.2015
Sastamala	Landsat 8	23.7.2014	10.7.–17.7.2014
Virolahti	Landsat 8	25.8.2013	25.6.–3.7.2013
Hyvinkää	Sentinel-2	17.8.2015	4.6.–1.8.2015
Turku	Landsat 8	23.7.2014	13.6.–22.6.2012

Taulukossa 5 on esitetty vertailtavat kanavaparit Landsat 8- ja Sentinel-2 -satelliiteista. Sentinel-2 -satelliitissa on kaksi lähi-infrakanavaa, joista tähän tutkimukseen valittiin kanava 8a eli kapea lähi-infra, koska se oli aallonpituudeltaan lähempänä Landsat 8 -satelliitin lähi-infrakanavaa.

Taulukko 5. Vertailtavat aallonpituuskanavat Landsat 8- ja Sentinel-2 -satelliiteista.

Landsat 8 kanava	Sentinel-2 kanava
1	1
2	2
3	3
4	4
5	8a
6	11
7	12

Landsat 8 -satelliittikuvat saatiin ladattua ilmakehäkoryttuna suoraan Yhdysvaltain geologian tutkimuskeskuksen sivuilta: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Ilmakehäkoryttamattomat Sentinel-2 -kuvat ladattiin vastaavasti Euroopan avaruusjärjestön ylläpitämiltä sivulta: <https://scihub.com/copernicus.eu/dhus/#/home>.

3. MENETELMÄT

Ensimmäisessä osiossa esitellään Sentinel-2 -satelliitin automaattinen ilmakehäkoryttaus. Seuraavassa osiossa käsitellään vastaavasti Landsat 8 -satelliitin ilmakehäkoryttaus. Menetelmien viimeisessä osiossa tarkastellaan tutkimuksessa suoritettuja aineiston prosessoiteja ja käytettyjä menetelmiä. Satelliittikuvat ja aineisto olivat jo valmiiksi osittain prosessoituja. Lisäksi satelliittikuville ja aineistolle suoritettiin erilaisia prosessoiteja tutkimuksen eri vaiheissa.

3.1 Sentinel-2 -satelliitin ilmakehäkoryttaus

Sentinel-2 -satelliitin ilmakehäkoryttatut kuvat ovat Level-2A -tuotteita, jotka ovat kooltaan 100 km² ja ne ovat kartografiselta geometrialtaan UTM/WGS84 -projektiossa (ESA 2015). Automaattinen ilmakehäkoryttaus perustuu Level-2A -tuotteissa pikselien luokitteluun (ESA 2015). Ilmakehäkoryttaus Sentinel-2 -satelliiteissa voidaan suorittaa Sen2Cor-nimisellä ohjelmalla.

Sentinel-2 -satelliittikuvan muokkaaminen ilmakehäkoryttamattomasta Level-1C -tuotteesta ilmakehäkoryttatuun Level-2A -tuotteeseen käsittää kaksi eri vaihetta. Nämä vaiheet ovat näkyvän luokittelu (Scene Classification) ja ilmakehäkoryttaus (ESA 2018a, ESA 2018b). Ensimmäisessä vaiheessa luodaan kuvasta luokittelukartta, jossa pikselit ovat luokiteltu esimerkiksi pilviksi, pilven varjoiksi, vedeksi tai kasvillisuudeksi (ESA 2018a, ESA 2018b). Luokittelussa luokitellaan erilaisten algoritmien avulla pilvet neljään eri luokkaan ja muut kuuteen eri luok-

kaan (ESA 2018a, ESA 2018b). Luokittelussa havaitaan ensin pilvet/lumet, jonka jälkeen havaitaan cirrukset ja lopuksi vielä pilvien varjot (ESA 2018a, ESA 2018b). Näiden jälkeen saadaan luotua luokittelukartta.

Toisessa vaiheessa muutetaan satelliittikuva ilmakehäkorjatuksi. Sentinel-2 -satelliitin ilmakehäkorjaus hyödyntää ilmakehän ja topografian korjaus (Atmospheric & Topographic Correction, ATCOR) algoritmia, joka perustuu LIBRADTRAN-säteilyn muutosmalliin (Richter & Schläpfer 2011, Mayer & Kylling 2005, ESA 2018a). LIBRADTRAN-säteilymallissa luodaan muunnostaulukko, jolla kuvataan muun muassa ilmakehän olosuhteita ja maanpinnan korkeuksia (ESA 2018a, ESA 2018b). Muunnostaulukkoa käytetään yksinkertaistettuna mallina laskemaan maanpinnan heijastussuhde (ESA 2018a). Aerosolien optinen tiheys (AOT) algoritmiin saadaan kuvasta käyttämällä siitä alueita, joiden heijastusominaisuudet tiedetään jo ennalta (ESA 2018a, ESA 2018b). Näitä alueita ovat tumman tiheet kohteet (Dark Dense Vegetation, DDV) ja vesistöt (ESA 2018a, ESA 2018b). Jos kuvasta ei löydetä tarpeeksi tummia kohteita, määritetään keskimääräisen kirkkaat referenssialueet kanavalla 12 eli SWIR 2 (ESA 2018a, ESA 2018b).

Vesihöyry määritetään näkymästä käyttämällä ilmakehän esikorjattua differentiaali absorptio (Atmospheric Pre-corrected Differential Absorption, APDA) algoritmia (ESA 2018a, ESA 2018b). Tässä algoritmista hyödynnetään kanavia 8a ja 9. Kanava 9 määrittää absorptiota ja 8a toimii ilmakehän ikkunakanavana (ESA 2018a, ESA 2018b). Ilmakehän ikkunat tarkoittavat aallonpituusalueita, joissa ilmakehä on hyvin energiaa läpäisevää (Lillesand ym. 2015).

Cirrukset poistetaan käyttämällä kanavaa 10 sekä VNIR- ja SWIR -kanavaa (ESA 2018a, ESA 2018b). Topografiavaikutus voidaan haluttaessa korjata käyttämällä tarkkaa korkeusmallia (ESA 2018a, ESA 2018b). Kuitenkaan tämän tutkimuksen ilmakehäkorjauksessa ei käytetty korkeusmallia.

3.2 Landsat 8 -satelliitin ilmakehäkorjaus

Landsat 8 -satelliitin kuvia on saatavilla valmiiksi ilmakehäkorjattuina Level-2 -tuotteina (USGS 2018). Landsat 8 -satelliitin ilmakehäkorjaus suoritetaan LaSRC (Landsat Surface Reflectance Code) -algoritmillä. Se käyttää 6SV-säteilyn siirtokoodia (Radiative Transfer Code). Kaava 1 on 6SV-säteilyn siirtokoodi (Vermote ym. 2016, Kotchenova ym. 2006, Vermote ym. 1997).

$$\begin{aligned}
P_{TOA}(\theta_s, \theta_v, \varphi, P, T_A, \omega_0, P_A, U_{H_2O}, U_{O_3}) = \\
Tg_{OG}(m, P)Tg_{O_3}(m, U_{O_3})[p_{atm}(\theta_s, \theta_v, \varphi, P, Aer, U_{H_2O}) + \\
Tr_{atm}(\theta_s, \theta_v, P, Aer)\frac{P_s}{1-S_{atm}(P, Aer)P_s}Tg_{H_2O}(m, U_{H_2O})] \quad (1)
\end{aligned}$$

jossa

P_{TOA} = ilmakehän yläpuolinen heijastus (Reflectance at the top of the atmosphere)

p_{atm} = ilmakehän sisäinen heijastus (Atmosphere intrinsic reflectance)

Tr_{atm} = ilmakehän kokonaistransmissio ylös- ja alaspäin (Total atmosphere transmission (downward and upward))

S_{atm} = ilmakehän pallomainen albedo (Atmosphere spherical albedo)

P_s = ilmakehäkorjauksesta saavutettu maanpinnan heijastus (Surface reflectance to be retrieved by the atmospheric correction procedure)

θ_s = auringon zeniittikulma (Solar zenith angle)

θ_v = sensorin zeniittikulma (View zenith angle)

φ = suhteellinen astimuuttikulma (The relative azimuth (or the difference between the solar and view azimuth angle))

P = paine ilmakehässä (The pressure that influences the number of molecules and the concentration of absorbing gases in the atmosphere)

Tg_{H_2O} = vesihöyryn läpäisevyys (Gaseous transmission by water vapor)

Tg_{O_3} = otsonin siirtymä (Gaseous transmission by ozone)

Tg_{OG} = muiden kaasujen läpäisevyys (Gaseous transmission by other gases)

U_{H_2O} = integroitu vesihöyryn pitoisuus (Integrated water vapor content)

U_{O_3} = integroitu otsonin pitoisuus (Integrated ozone content)

m = niin kutsuttu ilmassa. Laskettu kaavalla: $1/\cos(\theta_s)+1/\cos(\theta_v)$ (The so—called "air-mass")

T_A = aerosolien optinen tiheys (AOT) (Aerosol optical thickness)

ω_0 = aerosolien kertasironnan albedo (Aerosol single scattering albedo)

P_A = aerosolien vaihefunktio (Aerosol phase function)

Landsat 8 -satelliitin ilmakehäkorjauksessa otetaan huomioon molekyylien ja hiukkasten hajonta sekä vesihöyryn ja otsonin absorptio (Claverie ym. 2018). Osa ilmakehäkorjauksen parametreista ovat satelliittikuvan ulkopuolisista lähteistä. Maanpinnalla oleva paine sekä otsoni saadaan National Center for Environmental Prediction Global Data Assimilation System (NCEP GDAS) -säämallista ilmakehäkorjaukseen (Claverie ym. 2018). Vesihöyry taas saadaan

Terra -satelliitin MODIS-sensorin lähi-infrakanavista 18 ja 19 (Claverie ym. 2018, Vermote ym. 2016).

Aerosolien optinen tiheys (AOT) ilmakehäkorjauksessa määritetään Terra-satelliitin MODIS- ja MISR -sensorien kanavien maanpinnan heijastussuhteiden suhdelukujen avulla sekä käyttämällä Landsat 8 -satelliitin maanpinnan heijastussuhteen punaisen ja sinisen sekä punaisen ja rannikollinen/aerosoli kanavan välistä suhdetta (Claverie ym. 2018, Vermote ym. 2016).

3.3 Aineiston prosessointi

Sentinel-2 -satelliittikuvat ilmakehäkorjattiin Sen2Cor-ohjelmalla. Ilmakehäkorjauksissa käytettiin sen hetken uusinta Sen2Cor-versiota 2.5.5. Parametrit, joita käytettiin Sen2Corilla näkyvät taulukossa 6. Ilmakehäkorjauksessa ei käytetty korkeusmallia, koska sen automaattinen lataaminen ei ollut mahdollista osille pohjoisia alueita, joihin myös Suomi kuuluu.

Taulukko 6. Sen2Cor-ilmakehäkörjaus algoritmissa käytetyt parametrit Sentinel-2 -satelliittikuvien korjaamiseen.

Parametri		Tarkoittaa
Nb processes	1	Rinnakkaisten prosessien määrä 1
Median filter	0	
Aerosol	RURAL	Aerosolityyppi määritetty Rural
Mid lat	SUMMER	Keskileveysasteilla kesä
Ozone	h - 331	Määritetty ilmakehän lämpötilaominaisuudet ja otsonin sisältö Dobson-yksikössä. Asetettu oletukseen.
Wv correction	1	Korjataan vesihöyry kuvasta kanavalta 940 nm
Vis update mode	1	Näkyvyys voi muuttua
Wv watermark	1	Vesihöyry maan keskimääräinen
Cirrus correction	TRUE	Cirruksia korjataan kovalta
Brdf correction	21	
Brdf lower	0,22	
Visibility	23	Näkyvyys kilometreissä
Altitude	0,1	Korkeus kilometreissä
Wv thres cirrus	0,25	Vesihöyryn raja-arvo, jolloin cirruksen korjausta ei käytetä
Dem directory	NONE	Ei osoitetta mihin korkeusmalli tehdään
Dem reference	http://data-public:Gddci@data.cgiar-csi.org/srtm/tiles/GeoTIFF/	Korkeusmallin latausosoite, mutta ei käytetä tässä korjauksessa
Dem unit	0	Korkeusmallin korkeusarvon yksikkö on metreissä
Adjacency range	1	Etäisyysalue kilometreissä
SmoothWV map	100	Neliölaatikon sivujen pituus metreissä
Generate DEM output	FALSE	Ei käytetä korkeusmallia ilmakehäkörjauksessa
Generate TCI output	TRUE	
Generate DDV output	FALSE	Ei tuoteta DDV:tä

Vaiheessa 1 Landsat 8- ja Sentinel-2 -satelliittikuvia prosessoitiin vielä R-ohjelmointikielellä poistamalla pilvet kuvilta pilvimaskikanavan avulla sekä uudelleen otostamalla Sentinel-2 -kuvat 30 m:n resoluutioon, joka oli sama kuin Landsat 8 -kanavien resoluutio. Uudelleen otostamisessa myös Sentinel-2 -kuvat asetettiin samaan laajuuteen kuin missä Landsat-kuvat olivat. Kristiinankaupungin alueen satelliittikuville suoritettiin myös koordinaattimuunnos R-ohjelmointikielellä, jotta kuvat saatiin samaan koordinaatistoon koalojen kanssa.

Satelliittikuvan pikseleiltä irrotettiin numeroarvot käyttämällä lähimmän naapurin menetelmää, jossa aina otetaan lähin pikselin arvo. Tämän jälkeen nämä arvot muutettiin heijastussuhteiksi kertomalla luvulla 0,0001 (ESA 2018c, USGS 2018). Numeroarvojen irrotus pikseleiltä ja muuttaminen heijastussuhteiksi sekä tilastolliset tunnuksat saatiin R-ohjelmointikielen avulla. Alle 0.80 korrelaation saaneilta sinisen aallonpituuskanavan kuvilta poistettiin vielä visuaalisesti tarkastelemalla koaloja, jotka sattuivat pilvien tai cirruksien kohdalle. Etenkin Sentinel-

2 -satelliitin pilvimaski toimi osittain huonosti ja jätti selviä pilviä maskaamatta pois. Claverie ym. (2018) saivat myös tutkimuksessaan Sentinel-2 -pilvimaskin toimivuudesta huonoja tuloksia käyttäessään Fmask-pilvimaskialgoritmia.

Heijastussuhteista laskettiin kanavakohtaisesti jokaiselle kuvalle suhteellinen keskineliöpoikkeama eli RMSD % ja suhteellinen keskipoikkeama eli MD % sekä heijastussuhteiden keskiarvot satelliiteittain. Kaavassa 2 on esitetty suhteellisen RMSD:n laskentakaava ja kaavassa 3 on suhteellisen MD:n laskentakaava.

$$RMSD \% = 100 \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \frac{(a_i - b_i)^2}{n}}{\frac{(\bar{a} + \bar{b})}{2}}} \quad (2)$$

$$MD \% = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^n \frac{(a_i - b_i)}{n}}{\frac{(\bar{a} + \bar{b})}{2}} \quad (3)$$

jossa

a_i = Landsat 8 -satelliittikanavan heijastussuhde koealalla i

b_i = Sentinel-2 -satelliittikanavan heijastussuhde koealalla i

\bar{a} = Landsat 8 -satelliittikanavan heijastussuhteiden keskiarvo

\bar{b} = Sentinel-2 -satelliittikanavan heijastussuhteiden keskiarvo

n = koealojen määrä

Vaiheessa 2 kaikkien 22:n alueen satelliittikuvilta poistettiin pilvet pilvimaskien avulla. Pilvi-siltä satelliittikuvilta poistettiin vielä visuaalisesti koealat, jotka osuivat pilven tai cirruksen kohdalle. Landsat 8 -kuvien sekä yhden Landsat 5 -kuvan heijastussuhteet normalisoitiin vastaamaan Sentinel-2:n heijastussuhteita. Heijastussuhteiden normalisointiin luotiin mallit käyttämällä viittä parhaimman suhteellisen RMSD:n ja MD:n saanutta kuvaparia (taulukko 3). Normalisoinnissa Landsat-heijastussuhteita selitettiin Sentinel-heijastussuhteiden avulla kanavittain.

Landsat 8 -heijastussuhteet normalisoitiin myös käyttämällä Zhangin ym. (2018) tutkimuksessa käytettyjä heijastussuhteiden korjausmalleja, jotta voitiin vertailla tässä tutkimuksessa luotujen korjausmallien toimivuutta. Zhangin ym. (2018) tutkimuksessa luodut korjausmallit ovat taulukossa 7.

Taulukko 7. Zhangin ym. (2018) tutkimuksen korjausmallit.

Kanava	Malli
Sininen	Sentinel-2 = 0,0039 + 0,9383 * Landsat 8
Vihreä	Sentinel-2 = 0,0038 + 0,8909 * Landsat 8
Punainen	Sentinel-2 = 0,0006 + 0,9902 * Landsat 8
Lähi-infra	Sentinel-2 = 0,0147 + 0,9355 * Landsat 8
SWIR 1	Sentinel-2 = 0,0095 + 0,9938 * Landsat 8
SWIR 2	Sentinel-2 = 0,0065 + 0,9844 * Landsat 8

Vaiheessa 3 testattiin Kotivuoren ym. (2018) tutkimuksessa luodun valtakunnallisen tilavuusmallin toimivuutta. Tutkimuksen tarkoituksena oli tarkastella kuinka tarkasti puustontilavuutta voidaan ennustaa ilman maastomittauksia. Valtakunnallisen tilavuusmallin tarkkuutta arvioitiin käyttämällä siinä erilaisia muuttujia. Muuttujina perusmallissa Kotivuori ym. (2018) käyttivät kahta laserkeilausmuuttujaa. Näiden kanssa yhdessä käytettiin myös monia muita muuttujia kuten lämpösummaa sekä MODIS-sensorin kanavia. Esimerkiksi MODIS-sensorin NIR-kanavalla he saivat perusmallia alhaisemmat suhteelliset RMSE-arvot ja harhan arvot. Satelliittikuvien heijastussuhteilla näyttää olevan parantava vaikutus malliin. Tämän takia tässä tutkimuksessa haluttiin testata mallia myös tarkemman resoluution yhdistetyllä satelliittiaineistolla (Landsat 8 ja Sentinel-2).

Kaavassa 4 on esitetty valtakunnallinen tilavuusmalli kahdella laserkeilausselittäjämuuttujalla. Käyttämällä kahta laserkeilausmuuttujaa (avg_F ja $h95_L$) Kotivuori ym. (2018) saivat RMSE % arvoksi 28,6 ja harha % arvoksi 8,3.

$$\sqrt{V} = avg_F + h95_L \quad (4)$$

jossa

V = tilavuus

Tämän tutkimuksen mallissa käytettiin selittäjinä näiden kahden laserkeilausmuuttujan (avg_F ja $h95_L$) lisäksi kerrallaan yhtä eri muuttujaa (NDVI tai EVI) tai aallonpituuskanavaa (punainen, sininen, vihreä, lähi-infra, SWIR 1 tai SWIR 2). Kaavoissa (5–8) näkyy käytettyjen muuttujien kaavat.

$$NDVI = \frac{(NIR - punainen)}{(NIR + punainen)} \quad (5)$$

jossa

NIR = Lähi-infra aallonpituuskanava. Sentinel-2 kanava 8a ja Landsat 8 kanava 5

punainen = punainen aallonpituuskanava

$$\text{Sentinel 2 EVI} = 2,5 \times \left(\frac{B7-B4}{B7+(6 \times B4)-(7,5 \times B2)+1} \right) \quad (6)$$

jossa

B7 = kulminaatio 3 -kanava

B4 = punainen kanava

B2 = sininen kanava

$$\text{Landsat 8 EVI} = 2,5 \times \left(\frac{B5-B4}{B5+(6 \times B4)-(7,5 \times B2)+1} \right) \quad (7)$$

jossa

B5 = lähi-infrakanava

B4 = punainen kanava

B2 = sininen kanava

$$\text{RSR (Reduced Simple Ratio)} = \frac{\text{NIR}}{\text{punainen}} \times \frac{(\text{SWIR}_{\max} - \text{SWIR})}{(\text{SWIR}_{\max} - \text{SWIR}_{\min})} \quad (8)$$

jossa

SWIR_{\max} = Suurin SWIR 1 -kanavan heijastussuhde koko aineistosta

SWIR_{\min} = Pienin SWIR 1 -kanavan heijastussuhde koko aineistosta

Mallin luonnissa suoritettiin ristiinvalidointi siten, että vaiheen 2 aineistosta jätettiin pois yksi alue kerrallaan ja luotiin malli muiden alueiden perusteella, jolla ennustettiin tilavuus poisjätetylle alueelle. Tämä prosessi tehtiin erikseen jokaiselle alueelle.

Tilavuuden ennusteista laskettiin suhteellinen RMSE ja suhteellinen harha jokaiselle alueelle. Näistä tuloksista laskettiin vielä kaikkien alueiden RMSE % itseisarvojen keskiarvo ja harhan % itseisarvojen keskiarvo. Suhteellinen RMSE ja suhteellinen harha laskettiin vastaavalla kaavalla kuin RMSD % ja MD %. Erona laskennassa oli, että a oli ennustettava tilavuus ja b oli todellinen tilavuus. RMSE %:n ja harha %:n laskemisessa tulos jaettiin vain b:n todellisella tilavuudella eikä keskiarvo a:n ja keskiarvo b:n keskiarvolla, kuten suhteellisen RMSD:n ja suhteellisen MD:n laskennassa.

4. TULOKSET

Tutkimuksessa tulokset esitetään kolmessa eri osiossa. Ensimmäisessä osiossa käsitellään Landsat 8- ja Sentinel-2 -satelliittien heijastussuhteiden eroavuutta tilastotunnuksien avulla. Kyseisessä osiossa tarkastellaan Kristiinankaupungin, Savukosken ja Oriveden alueen kuvapareja. Seuraavassa osiossa esitellään Landsat 8- ja Landsat 5 -heijastussuhteiden normalisointiin luodut mallit. Lisäksi esitetään ensimmäisessä vaiheessa parhaimmat tilastolliset tunnuksien saaneet Landsat 8- ja Sentinel-2 -satelliittikuvaparien heijastussuhteet kuvaajilla sekä regressiosuorilla. Kolmannessa osiossa käsitellään valtakunnallisen tilavuusmallin toimivuutta tilastollisten tunnusten avulla.

4.1 Satelliittikuvien heijastussuhteiden erot

Ensimmäisessä vaiheessa Landsat 8- ja Sentinel-2 -satelliittien heijastussuhteiden eroavuutta verrattiin tilastollisten tunnuksien avulla. Tilastollisina tunnuksina käytettiin keskiarvoa, keski-
poikkeamaa (MD), korrelaatiota ja keskineliöpoikkeamaa (RMSD). Keski-
poikkeama sekä keskineliöpoikkeama oli laskettu prosentteina, jotta eroavuudet näkyisivät selkeämmin.

Ensimmäisen vaiheen tulokset näkyvät alla taulukoissa 8–13. Huonoimmat korrelaatiot ja muut tilastolliset tunnuksien saatiin Kristiinankaupungin alueen kuville. Huonoja tilastollisia arvoja saivat myös Savukosken (taulukon 8 kuvanumero 8) ja Oriveden alueelta vuonna 2017 otettu kuva. Kristiinankaupungin kuvilla yhteistä oli se, että ne olivat muita kuvia selvästi pilvisempiä. Pilvisyys näytti vaikuttavan kuvien heijastussuhteisiin selvästi, vaikka pilvimaskauksen lisäksi visuaalisesti tarkastelemalla pyrittiin poistamaan pilvien ja cirruksien alueelle sattuvat koealat.

Sininen aallonpituuskanava sai kaikilla kuvilla kaikista huonoimmat korrelaatiot. Suurimmalle osalle kuvista kuitenkin tämänkin kanavan korrelaatio oli yli 0,70. Sinisen aallonpituuskanavan keskiarvoissa oli selvää eroa Sentinel-2- ja Landsat 8 -satelliittien välisillä kuvilla. Kuitenkaan kaikkien kuvien keskiarvoista laskettujen keskiarvojen välillä ei ollut suurta eroa.

Kristiinankaupungin vuonna 2016 otettu kuva sekä Savukosken 18.8.2015/17.8.2015 kuva saivat sinisellä aallonpituuskanavalla korkean suhteellisen MD-arvon, sen ollessa yli – 55,53 %. Kaikkein suurimman MD % arvon sai kuitenkin Savukoski 20.8.2015/20.8.2015. Tämä MD-arvo on yllättävän suuri kuvalle, jossa ei ollut paljoa pilviä ja joka sai hyvän korrelaation. Suh-

teellinen RMSD ei kuitenkaan ollut paljoo tätä enempää, jolloin satunnaisvirheen määrä kyseisillä kuvilla oli kuitenkin vähäinen. Monissa pienemmän suhteellisen MD:n saaneissa kuvissa ero suhteellisen RMSD:n ja suhteellisen MD:n välillä oli suurempi kuin niissä, jotka saivat todella korkean MD % arvon (taulukko 8). Sinisellä aallonpituuskanavalla oli suuremmat suhteelliset MD- ja RMSD -arvot kuin muilla kanavilla.

Taulukko 8. Siniselle aallonpituuskanavalle saadut tilastolliset tunnuksat.

Kuva	Paikka	Päivä L8/S2	Ka. L8	Ka. S2	Korrelaatio	MD %	RMSD %
1	Kristiinankaupunki	18.8.2015/20.8.2015	0,014	0,015	0,63	11,60	24,48
2	Kristiinankaupunki	18.8.2015/23.8.2015	0,014	0,010	0,71	-26,90	34,97
3	Kristiinankaupunki	26.7.2016/25.7.2016	0,014	0,023	0,51	48,02	52,83
4	Orivesi	3.7.2015/17.8.2015	0,018	0,012	0,82	-37,68	41,80
5	Orivesi	20.8.2015/20.8.2015	0,015	0,013	0,84	-16,04	23,83
6	Orivesi	15.7.2017/30.6.2017	0,014	0,016	0,72	11,99	32,16
7	Savukoski	18.8.2015/17.8.2015	0,018	0,010	0,88	-55,53	59,42
8	Savukoski	20.8.2015/20.8.2015	0,021	0,009	0,89	-78,86	80,89
9	Savukoski	5.7.2016/22.7.2016	0,017	0,016	0,77	-5,22	16,95

Korrelaatiot vihreällä kanavalla olivat yli 0,75, lukuun ottamatta Kristiinankaupungin vuoden 2016 kuvaa, jolla korrelaatio oli 0,64. Keskiarvot S2- ja L8 -heijastussuhteiden välillä olivat lähellä toisiaan, ja kuvien välillä ei ollut suurta eroa. Vihreä aallonpituuskanava sai huomattavasti pienemmät suhteelliset MD- ja suhteelliset RMSD -arvot kuin sininen kanava. Suurimmat suhteelliset MD- ja suhteelliset RMSD -arvot tälläkin kanavalla saivat Kristiinankaupungin kuvat (taulukko 9).

Taulukko 9. Vihreälle aallonpituuskanavalle saadut tilastolliset tunnuksat.

Kuva	Paikka	Päivä L8/S2	Ka. L8	Ka. S2	Korrelaatio	MD %	RMSD %
1	Kristiinankaupunki	18.8.2015/20.8.2015	0,029	0,033	0,80	13,58	17,86
2	Kristiinankaupunki	18.8.2015/23.8.2015	0,029	0,028	0,83	-4,53	12,32
3	Kristiinankaupunki	26.7.2016/25.7.2016	0,032	0,039	0,64	18,88	24,08
4	Orivesi	3.7.2015/17.8.2015	0,035	0,030	0,91	-16,25	18,40
5	Orivesi	20.8.2015/20.8.2015	0,030	0,028	0,94	-3,98	8,88
6	Orivesi	15.7.2017/30.6.2017	0,032	0,036	0,75	9,98	20,27
7	Savukoski	18.8.2015/17.8.2015	0,035	0,034	0,91	-3,59	8,13
8	Savukoski	20.8.2015/20.8.2015	0,037	0,033	0,93	-12,42	13,87
9	Savukoski	5.7.2016/22.7.2016	0,040	0,038	0,80	-7,00	10,87

Punainen aallonpituuskanava sai hyviä korrelaatioita, niiden ollessa parhaimmillaan 0,971. Huonoimman korrelaation sai vuonna 2016 Kristiinankaupungin alueelta otettu kuva (taulukko 10). Oriveden vuoden 2017 kuva sai pienen suhteellisen MD -arvon, mutta yllättävän suuren suhteellisen RMSD -arvon, kun RMSD % oli 29,91. Keskiarvoissa punaisella kanavalla ei ollut

suurta eroa satelliittien välillä. Joillakin alueilla suhteellinen RMSD johtui suurelta osin satunnaisvirheestä, mutta toisilla taas oli selvästi MD-arvolla suurempi vaikutus RMSD-arvoon. Suhteelliset MD- ja RMSD -arvot eivät olleet erityisen suuria tällä kanavalla.

Taulukko 10. Punaiselle aallonpituuskanavalle saadut tilastolliset tunnuksat.

Kuva	Paikka	Päivä L8/S2	Ka. L8	Ka. S2	Korrelaatio	MD %	RMSD %
1	Kristiinankaupunki	18.8.2015/20.8.2015	0,018	0,020	0,86	7,57	19,34
2	Kristiinankaupunki	18.8.2015/23.8.2015	0,019	0,017	0,87	-10,95	20,84
3	Kristiinankaupunki	26.7.2016/25.7.2016	0,021	0,023	0,73	8,91	22,76
4	Orivesi	3.7.2015/17.8.2015	0,022	0,017	0,93	-22,18	26,47
5	Orivesi	20.8.2015/20.8.2015	0,019	0,017	0,95	-11,29	16,54
6	Orivesi	15.7.2017/30.6.2017	0,021	0,021	0,80	0,05	29,91
7	Savukoski	18.8.2015/17.8.2015	0,028	0,025	0,97	-10,99	15,63
8	Savukoski	20.8.2015/20.8.2015	0,029	0,025	0,97	-16,14	18,66
9	Savukoski	5.7.2016/22.7.2016	0,028	0,025	0,93	-9,37	14,45

Lähi-infrapunakanavalla korrelaatiot olivat todella hyviä, lukuun ottamatta paria Kristiinankaupungin kuvaa sekä yhtä Oriveden kuvaa, joissa oli myös muilla kanavilla muita huonompaa korrelaatiota (taulukko 11). Näitä kuvia lukuun ottamatta korrelaatio oli yli 0,867. Keskiarvojen välillä ei ollut käytännössä ollenkaan eroa, koska kuvien keskiarvoista otettu keskiarvo oli Landsat-satelliitilla 0,2181 ja Sentinel-satelliitilla 0,220. Suhteellinen MD oli vähäistä kaikilla kuvilla. Suhteellinen RMSD oli myös kohtalaisen pientä, lukuun ottamatta Kristiinankaupungin vuoden 2016 ja Oriveden vuoden 2017 kuvia. Suhteellisen MD:n osuus RMSD:stä oli vähäistä, joten satunnaisvirheen suhteellinen osuus oli kohtalaisen suurta.

Taulukko 11. Lähi-infra aallonpituuskanavalle saadut tilastolliset tunnuksat.

Kuva	Paikka	Päivä L8/S2	Ka. L8	Ka. S2	Korrelaatio	MD %	RMSD %
1	Kristiinankaupunki	18.8.2015/20.8.2015	0,222	0,232	0,90	4,45	9,49
2	Kristiinankaupunki	18.8.2015/23.8.2015	0,220	0,214	0,92	-2,92	7,89
3	Kristiinankaupunki	26.7.2016/25.7.2016	0,222	0,236	0,64	6,08	16,92
4	Orivesi	3.7.2015/17.8.2015	0,230	0,219	0,96	-4,55	8,12
5	Orivesi	20.8.2015/20.8.2015	0,213	0,209	0,98	-2,28	5,01
6	Orivesi	15.7.2017/30.6.2017	0,221	0,228	0,77	2,84	15,09
7	Savukoski	18.8.2015/17.8.2015	0,198	0,209	0,93	5,31	7,31
8	Savukoski	20.8.2015/20.8.2015	0,206	0,204	0,95	-1,26	4,63
9	Savukoski	5.7.2016/22.7.2016	0,231	0,234	0,87	1,27	6,20

Lyhyen aallonpituuden infrapuna 1 eli SWIR 1 (Short-Wavelength Infrared) -kanavalla korrelaatiot olivat yli 0,75 jopa kuville, jotka olivat saaneet muilla kanavilla huonoja korrelaatioarvoja (taulukko 12). Keskiarvojen välillä ei ollut suurta eroa, lukuun ottamatta Savukosken vuoden 2016 kuvaa, jossa ero keskiarvoissa oli selvästi erotettavissa. Suurimman suhteellisen MD -arvon sai Savukosken vuoden 2016 kuva, muuten kuitenkin suhteelliset MD -arvot kuvien

heijastussuhteiden välillä olivat kohtalaisia. Suhteelliset RMSD -arvotkaan eivät olleet suuria, mutta muutama kuva sai kohtalaisia arvoja niiden ollessa yli 22%.

Taulukko 12. SWIR 1 -aallonpituuskanavalle saadut tilastolliset tunnuksset.

Kuva	Paikka	Päivä L8/S2	Ka. L8	Ka. S2	Korrelaatio	MD %	RMSD %
1	Kristiinankaupunki	18.8.2015/20.8.2015	0,089	0,098	0,89	9,69	15,37
2	Kristiinankaupunki	18.8.2015/23.8.2015	0,090	0,090	0,91	0,39	10,95
3	Kristiinankaupunki	26.7.2016/25.7.2016	0,092	0,105	0,75	12,88	22,18
4	Orivesi	3.7.2015/17.8.2015	0,099	0,092	0,96	-6,92	10,56
5	Orivesi	20.8.2015/20.8.2015	0,085	0,086	0,98	0,56	5,38
6	Orivesi	15.7.2017/30.6.2017	0,086	0,100	0,86	14,67	22,44
7	Savukoski	18.8.2015/17.8.2015	0,126	0,138	0,97	9,27	10,58
8	Savukoski	20.8.2015/20.8.2015	0,132	0,137	0,98	3,71	5,79
9	Savukoski	5.7.2016/22.7.2016	0,119	0,149	0,90	22,04	23,62

Lyhyen aallonpituuden infrapuna 2 eli SWIR 2 sai korkeita korrelaatioarvoja kuten myös kanava SWIR 1. Selvät erot keskiarvojen välillä oli tälläkin kanavalla Savukosken vuoden 2016 kuvalla (taulukko 13). Suurimman suhteellisen MD -arvon sai Savukosken kuva, jossa oli myös eroa keskiarvojen välillä. Muuten MD % arvot olivat kohtalaisia, mutta suhteellisissa RMSD -arvoissa tämän yhden edellä mainitun kuvan lisäksi kohtalaisen suuren poikkeaman sai myös kuva 3 ja kuva 6.

Taulukko 13. SWIR 2 -aallonpituuskanavalle saadut tilastolliset tunnuksset.

Kuva	Paikka	Päivä L8/S2	Ka. L8	Ka. S2	Korrelaatio	MD %	RMSD %
1	Kristiinankaupunki	18.8.2015/20.8.2015	0,038	0,044	0,89	12,88	20,03
2	Kristiinankaupunki	18.8.2015/23.8.2015	0,039	0,040	0,90	1,93	14,48
3	Kristiinankaupunki	26.7.2016/25.7.2016	0,040	0,048	0,79	17,93	27,52
4	Orivesi	3.7.2015/17.8.2015	0,044	0,041	0,96	-8,23	13,23
5	Orivesi	20.8.2015/20.8.2015	0,037	0,038	0,98	3,12	8,05
6	Orivesi	15.7.2017/30.6.2017	0,041	0,048	0,87	15,50	27,92
7	Savukoski	18.8.2015/17.8.2015	0,060	0,070	0,98	15,59	17,04
8	Savukoski	20.8.2015/20.8.2015	0,064	0,067	0,98	5,55	7,99
9	Savukoski	5.7.2016/22.7.2016	0,053	0,072	0,92	30,25	32,58

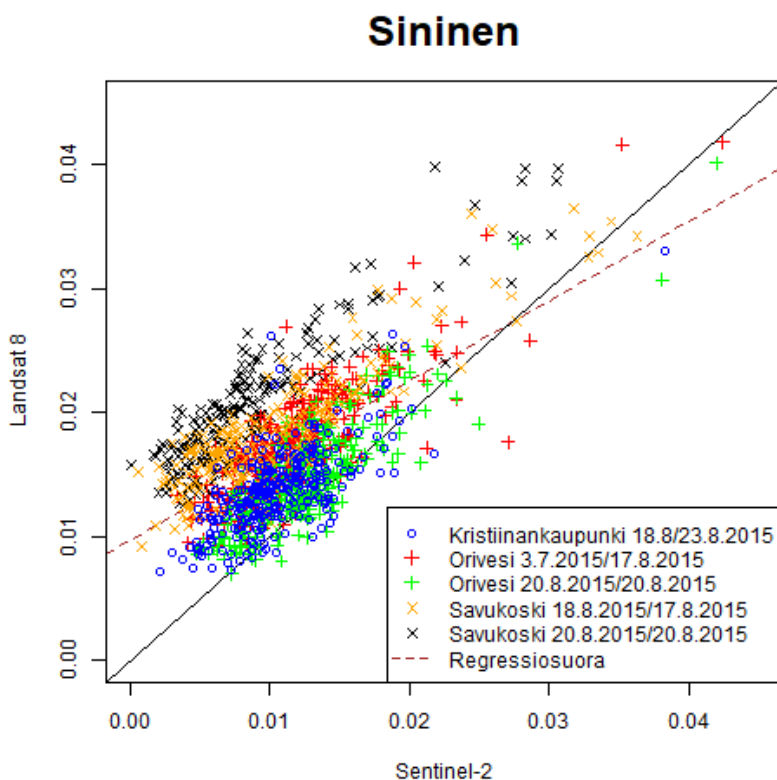
4.2 Korjausmallit ja regressiokuvaajat

Landsat 8- ja Landsat 5 -satelliittien heijastussuhteet normalisoitiin vastaamaan Sentinel-2 -satelliitin heijastussuhteita käyttämällä luotuja korjausmalleja (taulukko 14). Korjausmallit luotiin käyttämällä ensimmäisessä vaiheessa parhaat tilastolliset arvot saaneita kuvapareja siten, että mallissa Sentinel-2 -satelliitin heijastussuhteita selitettiin Landsat 8 -satelliitin heijastussuhteilla.

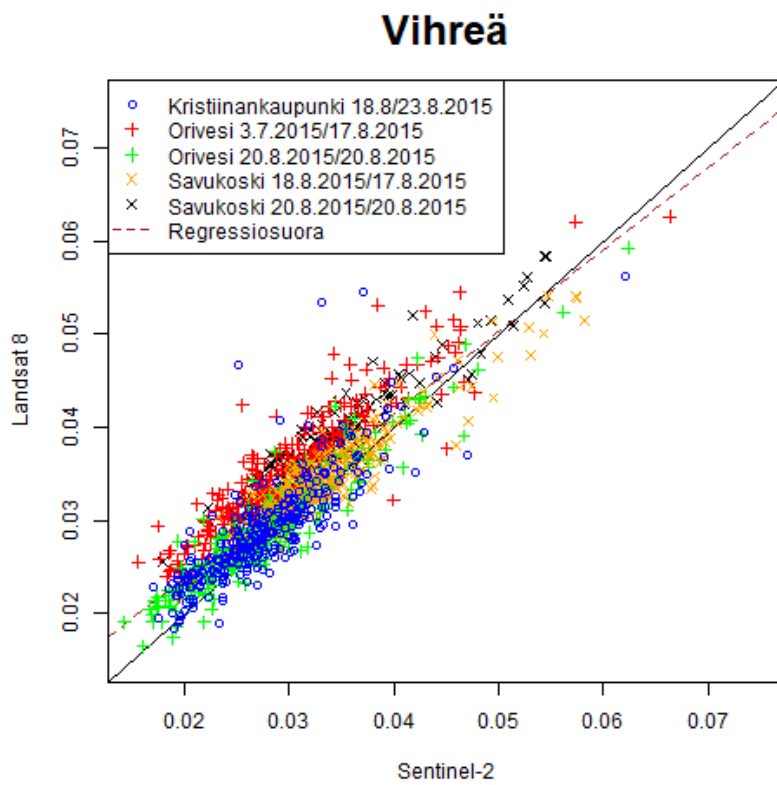
Taulukko 14. Landsat 8 -satelliitin heijastussuhteiden normalisointiin käytetyt mallit.

Kanava	Normalisointi malli
Sininen	Sentinel-2 = 0,009666 + 0,643786 * Landsat 8
Vihreä	Sentinel-2 = 0,006404 + 0,876720 * Landsat 8
Punainen	Sentinel-2 = 0,004611 + 0,920143 * Landsat 8
Lähi-infra	Sentinel-2 = 0,01201 + 0,95887 * Landsat 8
SWIR 1	Sentinel-2 = 0,01117 + 0,87886 * Landsat 8
SWIR 2	Sentinel-2 = 0,00554 + 0,84725 * Landsat 8

Kuvasta 4 voidaan havaita, että alueiden ja kuvapäivien välillä on selvää hajontaa. Hajontaa on myös selvästi Sentinel-2- ja Landsat 8 -satelliittien heijastussuhteiden välillä. Hajonta ei kuitenkaan erityisemmin muutu, vaikka heijastussuhteen arvo kasvaisi. Sinisen aallonpituuden kanava sai vaiheessa 1 huonoimmat RMSD % ja MD % arvot. Lisäksi arvot eri kuvaparien välillä olivat suuret. Parhaiten kuvaajaan sovitettiin Kristiinankaupungin ja Oriveden 20.8.2015 kuvaparit, jotka asettuvat lähelle 1:1 suoraa. Regressiosuorassa voidaan havaita voimakasta poikkeavuutta pienillä ja suurilla arvoilla.

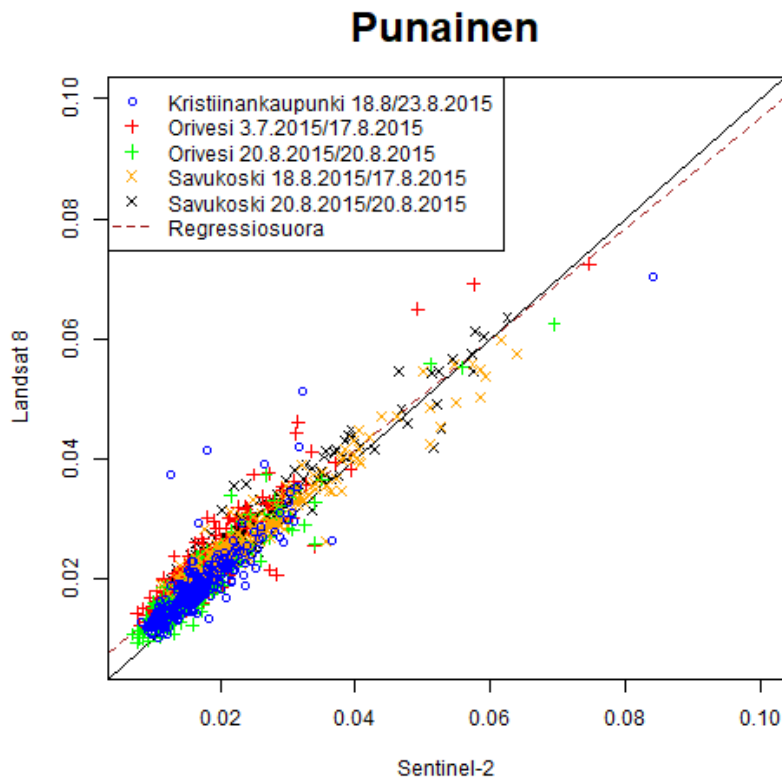
**Kuva 4.** Sinisen kanavan heijastussuhteet.

Vihreällä kanavalla hajonta satelliittien heijastussuhteiden välillä on vähäistä ja eri kuvaparien välillä on suhteellisen pienet erot hajonnassa. Hajonta kasvaa hieman suurilla heijastussuhteilla (kuva 5). Heijastussuhdearvot sijoittuvat lähelle 1:1 suoraa, ja regressiosuoralla on havaittavissa poikkeamaa pienillä ja suurilla arvoilla verrattuna 1:1 suoraan.



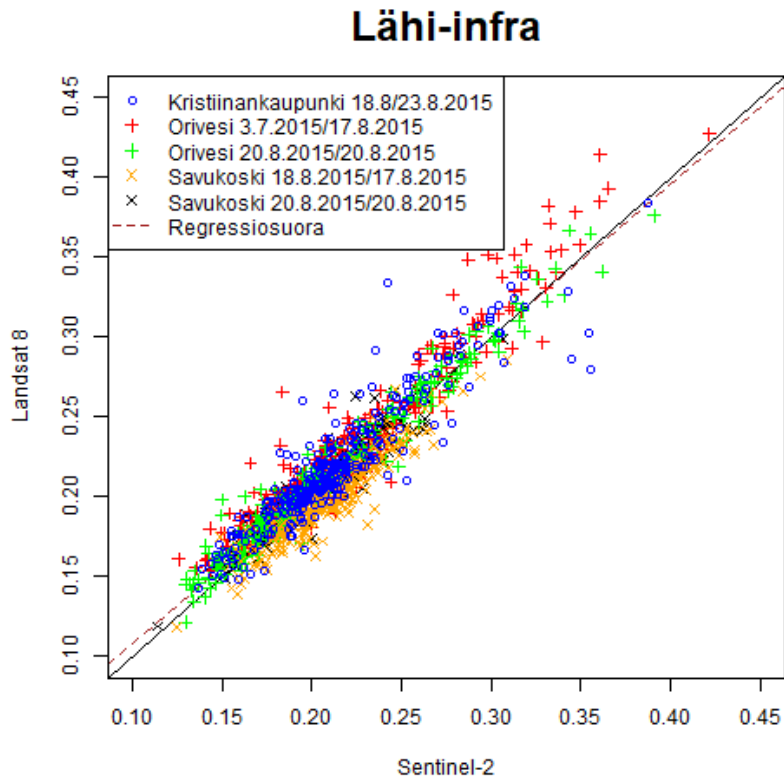
Kuva 5. Vihreän aallonpituuskanavan heijastussuhteet.

Punaisella kanavalla hajonta on hyvin pientä heijastussuhteiden välillä ja arvot asettuvat lähelle 1:1 suoraa (kuva 6). Hajonta kasvaa hieman arvojen kasvaessa, lisäksi kuvaajassa on joitakin yksittäisiä selvästi poikkeavia arvoja Kristiinankaupungin heijastussuhteissa. Regressiosuora asettuu hyvin lähelle 1:1 suoraa, ja siinä on havaittavissa selvää poikkeavuutta vain pienillä ja suurilla arvoilla.



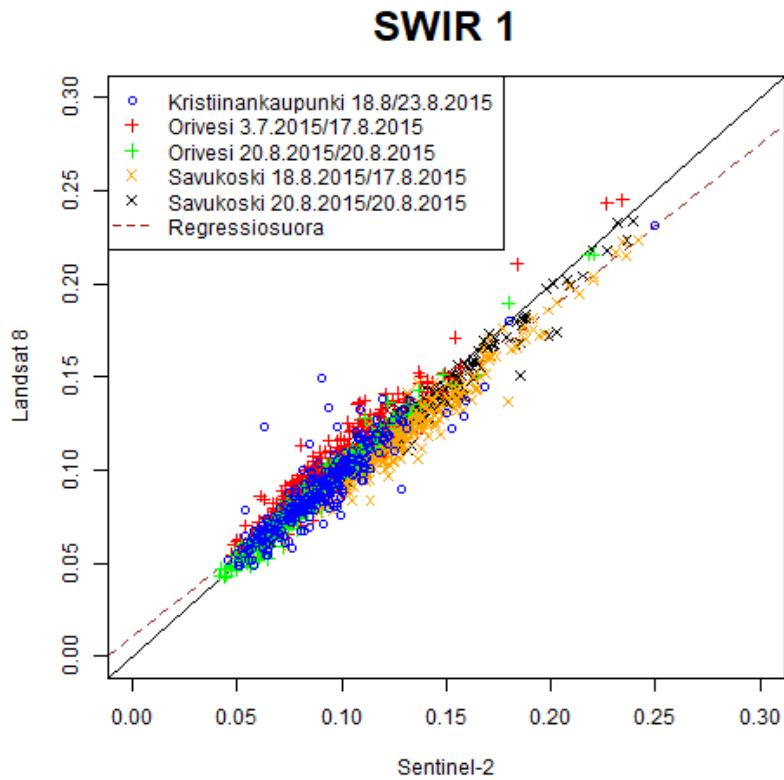
Kuva 6. Punaisen aallonpituuskanavan heijastussuhteet.

Hajonta on pientä lähi-infran aallonpituuskanavalla ja arvot asettuvat hyvin suoralle, ja regressiosuora on hyvin lähellä 1:1 suoraa (kuva 7). Hajonta kuitenkin kasvaa hieman suuremmilla arvoilla Oriveden 3.7.2015/17.8.2015 kuvaparilla. Kristiinankaupungilla ja edellä mainitulla Oriveden kuvaparilla on joitakin poikkeavia arvoja.



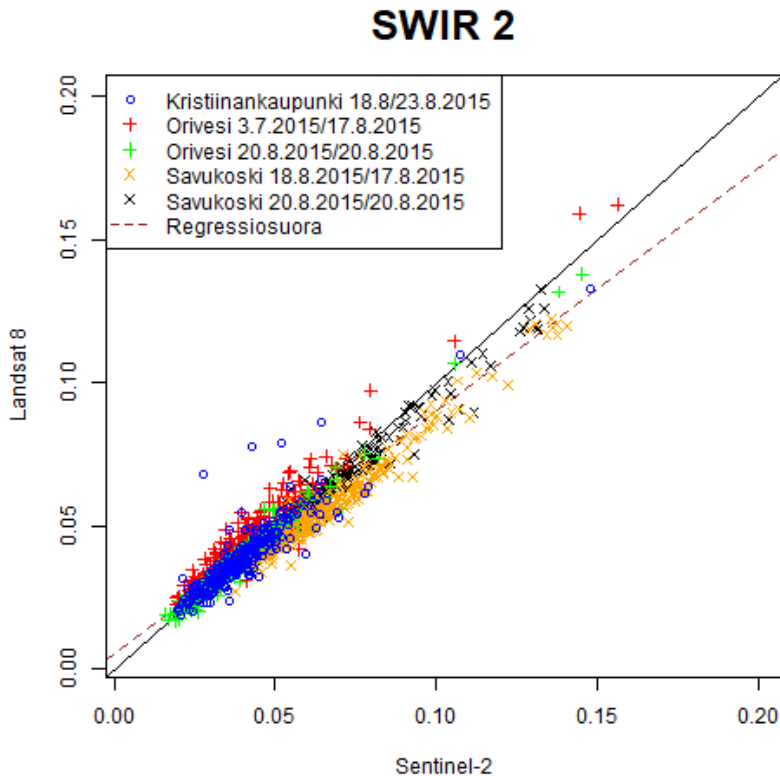
Kuva 7. Lähi-infra aallonpituuskanavan heijastussuhteet.

SWIR 1 -aallonpituuskanavan heijastussuhteilla on pieni hajonta ja ne asettuvat hyvin 1:1 suoralle (kuva 8). Regressiosuora asettuu lähelle 1:1 suoraa, lukuun ottamatta suurempia arvoja, joilla etäisyys kasvaa 1:1 suoraan. Myös pienillä arvoilla on regressiosuorassa poikkeamaa. Kristiinankaupungilla on tälläkin kanavalla yksittäisiä poikkeavia arvoja.



Kuva 8. SWIR 1 -aallonpituuskanavan heijastussuhteet.

Kuvassa 9 SWIR 2 -kanavan heijastussuhdearvot asettuvat hyvin 1:1 suoralle, mutta niiden etäisyys suoraan kasvaa, kun heijastussuhteet kasvavat. Regressiosuora poikkeaa suurilla arvoilla 1:1 suorasta selvästi, ja pienillä arvoilla on havaittavissa hyvin pientä poikkeavuutta.



Kuva 9. SWIR 2 -aallonpituuskanavan heijastussuhteet.

4.3 Valtakunnallisen tilavuusmallin kalibrointi

Sentinel-2- ja Landsat 8 -satelliittien yhteisaineisto oli kanavilla hieman parempi suhteellisessa RMSE:ssa kuin MODIS:lla saatu tulos. Erot olivat alle prosentin luokkaa, lukuun ottamatta punaista ja MIR -kanavaa, jotka olivat hieman yli prosentin parempia Sentinel-2- ja Landsat 8 -satelliittien yhteisaineistolla (taulukko 15). Kuitenkin NDV ja EVI saivat MODIS:lla hieman paremman suhteellisen RMSE -arvon. Suhteellinen harha oli hieman pienempi Sentinel-2- ja Landsat 8 -satelliittien yhteisaineiston sinisellä ja punaisella kanavalla kuin MODIS-kanavilla. MODIS sai kuitenkin hieman pienemmät arvot lähi-infran kanavalle ja SWIR 2 -kanavalle sekä NDV:lle ja EVI:lle. Suhteellisessa harhassakin erot olivat alle prosentin luokkaa, lukuun ottamatta lähi-infrakanavaa, joka sai MODIS:lla hieman yli prosentin pienemmän arvon.

Muuttuja RSR sekä vihreä kanava ja SWIR 1 -kanava, joista ei tässä tutkimuksessa ollut MODIS-sensorista vertailtavaa kohdetta, saivat suhteellista RMSE -keskiarvoa huonomman tuloksen. Suhteellisessa harhassakin vain vihreä kanava sai hieman keskiarvoa paremman tuloksen.

Zhangin ym. (2018) tutkimuksen malleilla korjatut Landsat 8 -heijastussuhteet saivat hyvin lähelle samat suhteelliset RMSE -arvot ja suhteellisen harhan arvot kuin tässä tutkimuksessa luodulla mallilla saatiin.

Taulukko 15. Todellisen tilavuuden ja satelliittien heijastussuhteiden muuttujilla sekä kahdella laserkeilausmuuttujalla ennustetun tilavuuden suhteellinen RMSE ja suhteellinen harha. Muuttujina käytettiin Sentinel-2- ja Landsat 8 -satelliittien heijastussuhteita. Landsat 8 -satelliitin heijastussuhteet normalisoitiin tässä artikkelissa luodulla mallilla ja Zhangin ym. (2018) tutkimuksessa käytetyllä mallilla. Lisäksi muuttujina käytettiin MODIS-sensorin heijastussuhteita.

Muuttuja	Omalla mallilla		Zhangin ym. mallilla		MODIS-sensorilla	
	RMSE %	BIAS %	RMSE %	BIAS %	RMSE %	BIAS %
Sininen	28,130	8,125	28,144	8,130	28,662	8,390
Vihreä	28,625	8,328	28,642	8,349		
Punainen	26,095	7,760	26,084	7,678	28,653	8,357
Lähi-infra	27,916	8,987	27,913	8,908	28,149	7,389
SWIR 1	28,442	8,675	28,465	8,618		
SWIR 2/MIR	26,376	8,623	26,295	8,403	28,655	8,331
NDV	28,573	8,489	28,577	8,541	28,449	8,275
EVI	28,364	8,072	28,533	8,390	28,047	7,358
RSR	28,791	8,399	28,806	8,427		

5. TULOSTEN TARKASTELO

Ensimmäisessä osiossa tarkastellaan Landsat 8 ja Sentinel-2 satelliittien heijastussuhteiden välisiä eroja. Toisessa osiossa keskitytään näiden erojen syihin ja mahdollisiin toimiin, joilla eroavuutta voitaisiin pienentää. Kolmannessa osiossa tarkastellaan tässä tutkimuksessa saatuja valtakunnallisen tilavuusmallin tuloksia sekä aiemman tutkimuksen tuloksia (Kotivuori ym. 2018)

5.1 Heijastussuhteiden erojen tarkastelu

Huonoimmat suhteelliset RMSD- ja MD -arvot sai sininen aallonpituuskanava. Korrelaatiot olivat myös selvästi muita kanavia alhaisempia. Huonoja arvoja selittää se, että ilmakehän vaikutus on suurta etenkin sinisellä aallonpituuskanavalla (Claverie ym. 2018). Tämän takia ilmakehäkorjauksen toimivuudella on suuri merkitys sinisellä kanavalla. Poikkeamaa sinisellä kanavalla saivat myös Claverie ym. (2018) tutkimuksessa, jossa he vertasivat Sentinel-2- ja Land-

sat 8 -satelliiteista luotua yhdistettyä Sentinel-2 aineistoa MODIS-sensoriin. Kuitenkaan vastaava yhdistetty aineisto Landsat 8 -satelliitilla ei tuottanut merkitsevää virhettä (Claverie ym. 2018). Tämän lisäksi myös Zhang ym. (2018) saivat tutkimuksessaan kaikista aallonpituuskanavista suurimman suhteellisen MD -arvon siniselle aallonpituuskanavalle, mutta arvo oli kuitenkin huomattavasti pienempi kuin tässä tutkimuksessa saatu.

Huonoimpia sinisen kanavan korrelaatioita saivat kuvaparit, joissa oli pilviä tai cirruksia. Vaikka niiden kohdalle osuvat koealat pyrittiin poistamaan pilvimaskin ja visuaalisen tulkinnan avulla, on joitakin koealoja voinut jäädä pilvien tai cirruksien alueelle. Ne vaikuttavat tuloksiin voimakkaimmin nimenomaan tällä sinisellä kanavalla. Sentinel-2 -satelliitin pilvimaski toimi osittain huonosti ja jätti selviä pilviä maskaamatta pois. Sentinel-2 -satelliitin pilvimaskin toimivuudesta saivat huonoja kokemuksia myös Claverie ym. (2018) tutkimuksessaan, kun he käyttivät automaattista Fmask-pilvimaski algoritmia. Kuvaan jääneet pilvet selittivät myös Sentinel-2- ja Landsat 8 -satelliittien heijastussuhteiden välistä suurta eroa Vuolon ym. (2016) tutkimuksessa.

Sentinel-2- ja Landsat 8 -satelliittien ilmakehäkorjauksien välillä on selvää eroa sinisellä aallonpituuskanavalla. Erot suhteellisissa RMSD- ja MD -arvoissa olivat sen verran suuria, että sinisen aallonpituuskanavan kuvien käyttö ristiin S2- ja L8 -satelliittien välillä on kyseenalaista ilman suhteellista normalisointia. Kuvasta 4 voidaan havaita, että sinisellä kanavalla arvot leviävät kuvaajassa hyvin isolle alueelle, vaikka kuvaajaan otettiin vain parhaimmat tilastolliset arvot (RMSD %, MD % ja korrelaatio) saaneet kuvaparit. Regressiokuvaaja sopii myös todella huonosti 1:1 suoraan.

Vihreä ja punainen kanava saivat jo selvästi pienempiä suhteellisia RMSD- ja MD -arvoja, vaikka vihreällä ja punaisella kanavallakin ilmakehän vaikutus on suurta (Claverie ym. 2018). Vihreällä ja punaisella kanavallakin huonoimpia korrelaatioita saivat kuvaparit, joissa oli ollut pilviä, mutta ero pilvettämiin kuviin oli vähäisempi kuin sinisellä aallonpituuskanavalla. Vihreällä ja punaisella kanavalla erot satelliittien heijastussuhteiden välillä olivat kohtalaisia. Kuvasta 5 voidaan huomata, että vihreän kanavan arvot sopivat kuvaajaan huomattavasti sinistä kanavaa paremmin, mutta ovat levinneet selvästi enemmän kuin punaisen kanavan kuvaajassa.

Lähi-infran aallonpituuskanava sai aallonpituuskanavista parhaimmat tulokset, vaikka ilmakehällä on vaikutusta tähänkin kanavaan (Claverie ym. 2018). Suhteelliset RMSD- ja MD -arvot olivat pieniä ja korrelaatiot olivat korkeita yhtä kuvaparia lukuun ottamatta. Korrelaatioiden

keskiarvo oli 0,88. Kuvassa 7 lähi-infrakanavan arvot asettuvat 1:1 suoralle todella hyvin, mutta regressiosuora poikkeaa hieman 1:1 suorasta.

SWIR 1- ja SWIR 2 -kanavat saivat pienet suhteelliset RMSD- ja MD -arvot ja korkeat korrelaatiot melkein kaikille kuvapareille. Näillä SWIR-aallonpituuskanavilla ilmakehän vaikutus ei ole niin suurta kuin aiemmin mainituilla kanavilla, koska aallonpituuden kasvaessa vähenee sironta ilmakehän kaasuista ja aerosolipartikkeleista (Cracknell & Hayes 2007). Kuvissa 8 ja 9 heijastussuhdearvot asettuvat hyvin kuvaajien suoriin lukuun ottamatta kahta kuvaparia, joilla hajonta hieman kasvaa arvojen kasvaessa. Regressiosuora asettuu myös lähelle 1:1 suoraa.

5.2 Syitä heijastussuhteiden eroihin ja keinoja niiden vähentämiseen

Landsat 8- ja Sentinel-2 -satelliitin ilmakehäkorjattujen aineistojen välillä on selvää eroa varsinkin näkyvän aallonpituuden kanavilla. Yksi syy eroavuuteen satelliittien välisissä heijastussuhteissa ovat ilmakehäkorjausalgoritmien väliset eroavuudet. Myös Li ym. (2018) saivat tutkimuksessaan eroa Sen2Cor- ja 6SV -ilmakehäkorjausalgoritmien välille. Samoin van der Werff ja van der Meer (2016) saivat tutkimuksessaan paremman korrelaation ilmakehäkorjaamattomien Sentinel-2- ja Landsat 8 -kuvien välille kuin ilmakehäkorjattujen.

Pilvien aiheuttama virhe voidaan nähdä myös yhtenä syynä heijastussuhteiden eroavuuteen, koska varsinkin korrelaatiot olivat monilla osittain pilvisillä kuvilla pilvettämiä kuvia alhaisempia. Eroavuutta on voinut myös aiheuttaa aikaero kuvaparien välillä, koska joillakin koealoilla on saatettu suorittaa metsänhoitotoimenpide tai on voinut tapahtua muita muutoksia. Kuvien ottopäivämäärien välillä saattoi olla pahimmillaan jopa kuukauden ero. Tämän takia esimerkiksi Zhang ym. (2018) käyttivät tutkimuksessaan Landsat 8- ja Sentinel-2 -kuvia, joiden kuvauspäivämäärien välinen ero oli maksimissaan yksi päivä. Osittain heijastussuhteiden eroavuuteen vaikuttavat myös satelliittien sensorien väliset eroavaisuudet, kuten aallonpituuskanavien leveydet ja spatiaalinen resoluutio sekä radiometriset ominaisuudet (Mandanici ja Bitelli 2016, Flood 2017). Kuitenkin nämä sensorien väliset erot on havaittu vähäisiksi aiemmissä tutkimuksissa, mutta vaikuttavat silti osittain heijastussuhteiden eroavuuteen (Li ym. 2017, Flood 2017).

On vaikea määrittää, kuinka paljon erot heijastussuhteissa johtuvat ilmakehäkorjausalgoritmien eroavaisuudesta, koska pilvisyydellä ja muilla tekijöillä on voinut olla vaikutusta heijastussuhteiden eroavaisuuksiin. Pilvisyydellä näytti olevan selvää vaikutusta heijastussuhteiden välisiin

korrelaatioihin, mutta toisaalta todella huonoja suhteellisia RMSD- ja MD -arvoja saivat myös kuvaparit, joissa ei ollut pilviä ja, jotka olivat saaneet korkeat korrelaatiot. Tämän takia voidaan epäillä, että ilmakehäkorjauksella on suurempi merkitys eroihin heijastussuhteissa. Etenkin huomioitaessa aiemmissa tutkimuksissa saadut tulokset, jotka osoittavat, että Landsat 8 ja Sentinel-2 ilmakehäkorjauksien välillä on eroa (Li ym. 2018, Korhonen ym. 2017, van der Werff ja van der Meer 2016).

Landsat 8 ja Sentinel-2 heijastussuhteiden välistä eroavuutta olisi mahdollista vähentää käyttämällä samaa ilmakehäkorjausmenetelmää, kun muodostetaan yhteisaineistoa. Claverie ym. (2018) saivat tutkimuksessaan hyviä tuloksia, kun he korjasivat molempien satelliittien kuvat LaSRC -algoritmillä. Käyttäessään samaa ilmakehäkorjausalgoritmia, myös Flood (2017) sai tutkimuksessaan pienet erot Landsat 8- ja Sentinel-2 -satelliittien välille. Kun käytetään samaa ilmakehäkorjausalgoritmia, vältetään niiden välisiltä eroavaisuuksilta (Zhang ym. 2018). Zhang ym. (2018) korjasivat myös tutkimuksessaan Landsat 8- ja Sentinel-2 -satelliittien kuvat samalla ilmakehäkorjausalgoritmillä saaden paljon pienemmät suhteelliset MD -arvot kuin tässä tutkimuksessa saatiin. He kuitenkin huomasivat, että heijastussuhteissa on eroa satelliittien välillä, vaikka he käyttivät samaa ilmakehäkorjausalgoritmia. Tämä osoittaa sen, että myös muilla tekijöillä kuin ilmakehäkorjauksella on vaikutusta heijastussuhteiden eroavuuteen.

Sentinel-2 ilmakehäkorjaus voisi myös toimia paremmin, jos siinä käytettäisiin korkeusmallia, jota ei tässä tutkimuksessa käytetty. Toisaalta Li ym. (2018) suosittelivat tutkimuksessaan käyttämään jotain muuta ilmakehäkorjausalgoritmia kuin Sen2Cor:ta. Tämän takia ilmakehäkorjausalgoritmia valittaessa tulisi myös perehtyä siihen, kuinka hyvin kyseinen algoritmi toimii, koska algoritmien välillä näyttää olevan suurta eroa. Pilvien aiheuttamaa vaikutusta heijastussuhteiden eroavaisuuteen oltaisiin voitu vähentää myös poistamalla pikselit, jotka olivat pilvien, pilvienvarjojen tai cirruksien vieressä kuten Zhang ym. (2018) tutkimuksessa tehtiin.

5.3 Valtakunnallisen tilavuusmallin toimivuuden tarkastelua

Tämän tutkimuksen korjausmallilla korjattu sininen aallonpituuskanava sai hieman pienemmän suhteellisen RMSE -arvon ja suhteellisen harhan arvot Kotivuori ym. (2018) tilavuusmallin kalibroinnista kuin mitä saatiin MODIS-satelliittikuva-aineistolla sekä Zhangin ym. (2018) mallilla korjatulla satelliittikuva-aineistolla. Suhteellinen normalisointi on toiminut hyvin, koska sininen kanava sai korkeat suhteelliset RMSD- sekä MD -arvot satelliittien heijastussuhteita verrattaessa, ja siten tulos olisi voinut olla huonompi. Punaisen kanavan suhteellinen

RMSE ja suhteellinen harha olivat hieman yli prosentin pienemmät kuin MODIS:lla. SWIR 2 -kanava sai myös hieman yli prosentin pienemmän suhteellisen RMSE:n, mutta MODIS sai pienemmän suhteellisen harhan arvon. Uskoisin näiden parempien tulosten johtuvan S2- ja L8 -satelliittien tarkemmasta resoluutiosta.

Yllättävää tutkimuksessa oli, että NDVI ja EVI saivat molemmat suuremmat suhteelliset RMSE -arvot ja suhteelliset harhan arvot tilavuusmallin kalibroinnista S2- ja L8 -satelliittien yhdistetyllä aineistolla kuin MODIS:lla saadut arvot, vaikka aallonpituuskanavat saivat suurilta osin paremmat suhteelliset RMSE -arvot ja suhteelliset harhan arvot. Siihen, että MODIS sai joillakin kanavilla pienemmät suhteelliset harhan arvot ja suhteelliset RMSE -arvot, on voinut vaikuttaa se, että joillakin kuvilla oli mittaus- ja kuvauspäivämäärän välillä suuri ero. Pahimmillaan se oli jopa kaksi vuotta, koska tarpeeksi pilvetöntä kuvaa ei ollut löydettävissä lähempänä mittauspäivämäärää. Tämä aiheuttaa virhettä aineistoon, koska osalle koealoista on saatettu tehdä avohakkaus mittauspäivämäärän jälkeisinä vuosina.

Tarkemman resoluution satelliittiaineiston käyttö ei kuitenkaan näytä parantavan voimakkaasti tilavuusmallia, koska erot olivat hyvin pieniä, lukuun ottamatta punaista ja SWIR 2 -kanavaa, jotka saivat kuitenkin hieman yli prosentin parannuksen. Toisaalta S2- ja L8 -satelliittiaineiston yhteiskäyttö näyttää toimivan silloin, kun toisen satelliitin heijastussuhteet on suhteellisesti normalisoitu vastaamaan toisen satelliitin heijastussuhteita.

Vaihtoehtoista heijastussuhteiden korjausmallia (Zhang ym. 2018) käytettäessä saatiin käytännössä sama tulos kuin tässä tutkimuksessa luodulla korjausmallilla. Joillakin kanavilla Zhangin ym. (2018) tutkimuksen malli oli hieman parempi kuin tämän tutkimuksen mallilla korjattu. Heijastussuhteiden normalisointi näyttääkin onnistuvan myös käyttämällä yleistä mallia, eikä siten aina välttämättä tarvitsisi luoda omaa mallia.

RSR sai sekä omalla että Zhang ym. (2018) tutkimuksessa luodulla mallilla keskiarvoa huonomman suhteellisen RMSE -arvon ja suhteellisen harhan arvon. RSR oli huonompi kuin NDV ja EVI, joten sen käyttäminen kalibroinnissa ei parantanut tulosta. Vihreä ja SWIR 1 -kanava saivat myös keskiarvoa huonomman suhteellisen RMSE -arvon eikä niillä siten vaikuta olevan parantavaa merkitystä valtakunnalliseen tilavuusmalliin.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Sentinel-2- ja Landsat 8 -satelliittien ilmakehäkorjattujen aineistojen välillä on selvää eroa varsinkin näkyvän aallonpituuden kanavilla. Sininen aallonpituuskanava sai suuret suhteelliset RMSD- ja MD -arvot, joiden perusteella voi todeta, että sinisen kanavan käyttö on epäluotettavaa silloin, kun aineistoa käytetään samaan aikaan sekä Landsat 8- että Sentinel-2 -satelliitista. Kuitenkin normalisoituna sinisen kanavan kuvat toisen satelliitin suhteen antoivat hieman pienemmän suhteellisen RMSE:n ja suhteellisen harhan tilavuuden ennustamiselle kuin MODIS-sensorin sininen kanava. Vihreällä ja punaisella kanavalla oli myös havaittavissa selviä eroja Landsat 8 ja Sentinel-2 heijastussuhteiden välillä, jonka takia kuvien suhteellinen normalisointi on välttämätöntä tarkan tuloksen saamiseksi, jos halutaan hyödyntää yhdessä kummankin satelliitin aineistoa. Lähi-infra, SWIR 1- ja SWIR 2 -aallonpituuskanavilla suhteelliset RMSD ja MD olivat kaikista pienimmät, ja korrelaatiot olivat korkeita.

Landsat 8 ja Sentinel-2 heijastussuhteiden välisten erojen vuoksi kannattaisi yhteisaineistoa luotaessa käyttää samaa ilmakehäkorjausmenetelmää, jolloin välttyttäisiin algoritmien välisiltä eroavuuksilta. Sentinel-2 pilvimaskin huonoa toimivuutta tulisi selvittää ja kehittää siihen toimiva menetelmä, jotta osittain pilvistä Sentinel-2 satelliittikuva-aineistoa voitaisiin käyttää luotettavasti.

Sentinel-2- ja Landsat 8 -satelliittien yhteisaineiston käyttö paransi hieman joillakin kanavilla valtakunnallista tilavuusmallia, mutta parannus oli sen verran vähäistä, että sillä ei näytä olevan suurempaa merkitystä. Tämä vaati kuitenkin satelliittikuvien normalisoinnin toisen satelliitin suhteen. Kaikki käytetyt Sentinel-2- ja Landsat 8 -satelliittien yhteisaineiston aallonpituuskanavat saivat pienemmän suhteellisen RMSE:n tilavuusmallista kuin vastaavat kanavat MODIS-sensorilla. Kuitenkin suhteelliset harhat olivat joillakin MODIS-kanavilla hieman pienempiä kuin Sentinel-2 ja Landsat 8 yhdistetyn aineiston kanavilla.

Zhang ym. (2018) tutkimuksen korjausmalleja käytettäessä saatiin valtakunnallisesta tilavuusmallista tulokseksi melkein sama tulos kuin käytettäessä tässä tutkimuksessa luotuja Landsat 8 -kuvien korjausmalleja. Voidaan todeta, että korjausmalleja olisi mahdollista hyödyntää myös muissa tilanteissa ilman, että aina olisi luotava uusi korjausmalli. Kuitenkin tästä aiheesta tarvitaan vielä lisätutkimuksia ennen kuin sitä voidaan soveltaa käytäntöön.

KIRJALLISUUS

Berk, A., Bernstein, L. S., Anderson, G. P., Acharya, P. K., Robertson, D. C., Chetwynd, J. H. & Adler-Golden, S. M. 1998. MODTRAN cloud and multiple scattering upgrades with application to AVIRIS. *Remote Sensing of Environment* 65: 367-375.

Chavez JR, P. S. 1996. Image-based atmospheric corrections – revisited and improved. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 62: 1025-1036

Chavez JR, P. S & Mackinnon D. J. 1994. Automatic detection of vegetation changes in the Southwestern United States using remotely sensed images. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 60 (5): 571-583.

Chavez JR, P. S. 1989. Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper multispectral images. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 55: 1285-1294.

Chuvieco, E. 2016. *Fundamentals of satellite remote sensing: an environmental approach*. Taylor & Francis Group: 468 s.

Claverie, M., Ju, J., Masek, J. G., Dungan, J. L., Vermote, E. F., Roger, J. C., Skakun, S. V. & Justice, C. 2018. The Harmonized Landsat and Sentinel-2 surface reflectance data set. *Remote Sensing of Environment* 219: 145-161.

Coppin, P & Bauer, M. E. 1994. Processing of multitemporal Landsat TM imagery to optimize extraction of forest cover change features. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 32(4): 918-927.

Cracknell, A. P & Hayes. L. 2007. *Introduction to remote sensing*. Taylor & Francis Group, USA. 335 s.

Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F. & Bargellini, P. 2012. Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment* 120: 25-36.

Flood, N. 2017. Comparing Sentinel-2A and Landsat 7 and 8 using surface reflectance over Australia. *Remote Sensing* 9, 659: 1-14 s.

Haan, J. F., Hovenier, J. W., Kokke, J. M. M. & Stokkom, H. T. C. 1991. Removal of atmospheric influences on satellite-borne imagery: a radiative transfer approach. *Remote Sensing of Environment* 37: 1-21.

Heiskanen, J., Rautiainen, M., Korhonen, L., Möttöus, M. & Stenberg, P. 2011. Retrieval of boreal forest LAI using a forest reflectance model and empirical regressions. *International journal of applied earth observation and geoinformation* 13: 595-606.

Holm, R. G., Jackson, R. D., Yan, B., Moran, M. S., Slater, P. N. & Bigger, S. F. 1989. Surface reflectance factor retrieval from Thematic Mapper data. *Remote Sensing of Environment* 27: 47-57.

IKONOS, imagery product guide. 2006. [Verkkodokumentti]. GeoEye. Saatavilla: http://glcf.umd.edu/library/guide/IKONOS_Product_Guide_jan06.pdf [Viitattu 8.1.2019]

Instrument: AVHRR/3. [Verkkolehti]. OSCAR (observing systems capability analysis and review tool). Saataavilla: <https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/62> [Viitattu 8.1.2019] (OSCAR, 2019b)

Kaufman, Y. J., Wald, A. E., Remer, L. A., Gao, B-C., Li, R-R. & Flynn, L. 1997. The MODIS 2.1 μm channel-correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, volume 35, no 5: 1286-1298.

Kneizys, F. X., Shettle, E. P., Gallery, W. O., Chetwynd JR, J. H., Abreu, L. W., Selby, J. E. A., Fenn, R. W. & McClatchey, R. A. 1980. Atmospheric transmittance/radiance: computer code LOWTRAN 5. Air force geophysics laboratory. Environmental research papers 597: s 233

Korhonen, L., Hadi, Packalen, P. & Rautiainen, M. 2017. Comparison of Sentinel-2 and Landsat 8 in the estimation of boreal forest canopy cover and leaf area index. Remote Sensing of Environment 195: 259-274.

Kotchenova, S. Y., Vermote, E. F., Levy, R. & Lyapustin, A. 2008. Radiative transfer codes for atmospheric correction and aerosol retrieval: intercomparison study. Optical society of America: 1-12.

Kotchenova, S. Y., Vermote, E. F., Matarrese, R. & Klemm Jr, F. J. 2006. Validation of a vector version of the 6S radiative transfer code for atmospheric correction of satellite data. Part I: Path radiance. Optical society of America, vol 45, no 26: 1-13 s.

Kotivuori, E., Maltamo, M., Korhonen, L. & Packalen, P. 2018. Calibration of nationwide airborne laser scanning based stem volume models. Remote Sensing of Environment 210: 179-192.

Landsat 8 surface reflectance code (LASRC) product guide. 2018. [Verkkodokumentti]. USGS. Saataavissa: https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/lasrc_product_guide.pdf. [Viitattu 5.1.2019]

Landsat 8 (L8) data users handbook, version 2.0. 2016. [Verkkodokumentti]. USGS. Saataavissa: <https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/Landsat8DataUsersHandbook.pdf>. [5.1.2019]

Level-2A algorithm overview. European Space Agency (ESA). Euroopan avaruusjärjestö. [Verkkolehti]. Saataavilla: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/level-2a/algorithm>. [Viitattu 5.12.2018] (ESA 2018a)

Liang, S. 2004. Quantitative remote sensing of land surfaces. John Wiley & Sons, Inc, Yhdysvallat. 534 s.

Li, S., Ganguly, S., Dungan, J. L., Wang, W. & Nemani, R. R. 2017. Sentinel-2 MSI radiometric characterization and cross-calibration with Landsat 8 OLI. Advances in Remote Sensing 6: 147-159.

Li, Y., Chen, J., Ma, Q., Zhang, H. K. & Liu, J. 2018. Evaluation of Sentinel-2A surface reflectance derived using Sen2Cor in North America. IEEE journal of selected topics in applied earth observations and Remote Sensing, Volume 11, Issue 6: 1997-2021.

Lillesand, T. M., Kiefer, R. W. & Chipman, J. W. 2015. Remote sensing and image interpretation. John Wiley & Sons, Inc, Yhdysvallat. 720 s.

Mandanici, E. & Bitelli, G. 2016. Preliminary Comparison of Sentinel-2 and Landsat 8 Imagery for a Combined Use. Remote Sensing 8, 1014: 1-10 s.

Mayer, B. & Kylling, A. 2005. Technical note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations – description and examples of use. Atmospheric chemistry and physics 5: 1855-1877

Moran, M. S., Jackson, R. D., Slater, P. N. & Teillet, P. M. 1992. Evaluation of simplified procedures for retrieval of land surface reflectance factors from satellite sensor output. Remote Sensing of Environment 41: 169-184.

Overview. European Space Agency (ESA). [Verkkolehti]. Euroopan avaruusjärjestö. Saatavilla: http://m.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Overview4. [Viitteen 5.1.2019]

Radcliff, M. R., Lepsch, A. E., Irons, J. R. & Chase, T. 2017. Landsat sensors: pushbroom vs whiskbroom. NASA. [Verkkolehti]. Saatavissa: <https://svs.gsfc.nasa.gov/12754> [Viitattu 5.1.2019]

Richter, R. & Schläpfer, P. 2016. Atmospheric/topographic correction for satellite imagery. ATCOR-2/3 user guide, version 9.0.2. ReSe application Schläpfer: 1-263.

Sentinel-2 user handbook. 2015. [Verkkodokumentti]. Euroopan avaruusjärjestö. Saatavissa: https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook [Viitattu 13.1.2019]

Sen2Cor configuration and user manual. 2018 [Verkkodokumentti]. Euroopan avaruusjärjestö. Saatavissa: http://step.esa.int/main/third-party-plugins-2/sen2cor/sen2cor_v2-5-5/ [Viitattu 13.1.2019] (ESA 2018b)

Satellite: NOAA-19. [Verkkolehti]. OSCAR (observing systems capability analysis and review tool). Saatavilla: <https://www.wmo-sat.info/oscar/satellites/view/341> [Viitattu 8.1.2019] (OSCAR, 2019a)

Song, C., Woodcock, C. E., Seto, K. C., Lenney, M. P. & Macomber, S. A. 2001. Classification and change detection using Landsat TM data: when and how to correct atmospheric effects?. Remote Sensing of Environment 75: 230-244.

S2 MPC, L2A product definition document. 2018. [verkkodokumentti]. Euroopan avaruusjärjestö. Saatavilla: <http://step.esa.int/thirdparties/sen2cor/2.5.5/docs/S2-PDGS-MPC-L2A-PDD-V2.5.5.pdf> [Viitattu 7.1.2019] (ESA 2018c)

Van der Werff, H & van der Meer, F. 2016. Sentinel-2A MSI and Landsat 8 OLI provide data continuity for geological remote sensing. Remote Sensing 8: 883.

Vermote, E., Justice, C., Claverie, M. & Franch, B. 2016. Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product. Remote Sensing of Environment 185: 46-56.

Vermote, E. F., Tanré, D., Deuze, J. L., Herman, M. & Morcrette, J. J. 1997. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, volume 35, issue 3: 675-686 s.

Vuolo, F., Żółtak, M., Pipitone, C., Zappa, L., Wenng, H., Immitzer, M., Weiss, M., Baret, F. & Atzberger, C. 2016. Data service platform for Sentinel-2 surface reflectance and value-added products: system use and examples. *Remote Sensing* 8: 938.

Zhang, H. K., Roy, D. P., Yan, L., Li, Z., Huang, H., Vermote, E., Skakun, S. & Roger, J. C. 2018. Characterization of Sentinel-2A and Landsat 8 top of atmosphere, surface, and nadir BRDF adjusted reflectance and NDVI differences. *Remote Sensing of Environment* 215: 482-494.