

Metsän rakenteellisten muutosten vaikutus pintalämpötilaan (valmiin työn esittely)

Antti Kärkkäinen

31.10.2025

Ohjaaja: Eetu Puttonen

Valvoja: Pekka Pere

Työn saa tallentaa ja julkistaa Aalto-yliopiston avoimilla verkkosivuilla. Muilta osin kaikki oikeudet pidätetään.

Tausta

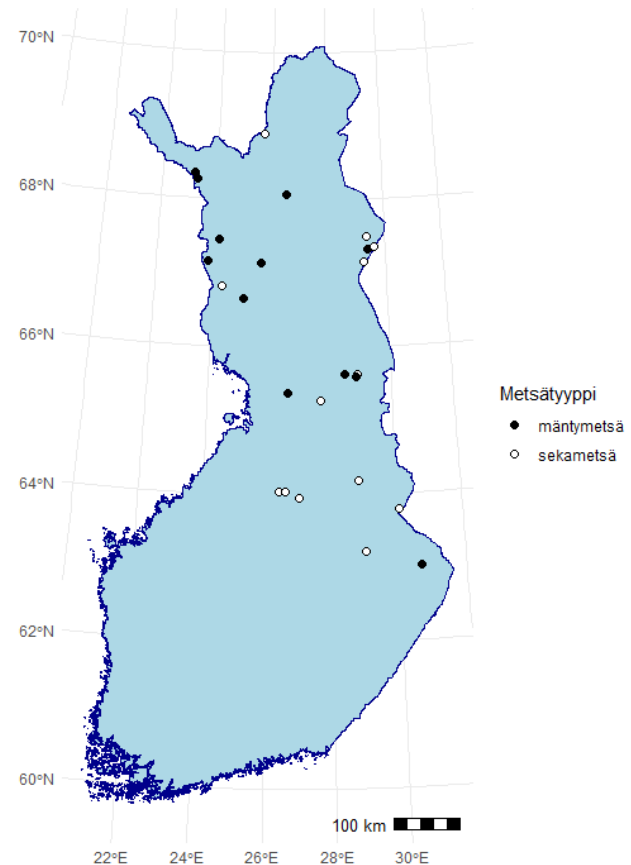
- Suomessa hakattiin vuonna 2024 yli 73 miljoonaa kuutiometriä metsää (Luonnonvarakeskus, 2025)
- Metsillä kriittinen rooli ilmaston säätelyssä
 - Miten paikallinen puuston häviäminen vaikuttaa tähän?
- Maan pintalämpötila yksi tärkeimmistä ekologisiin prosesseihin vaikuttavista ilmastomuuttujista
 - Hydrologinen kierto, kasvien fenologia yms.
- Metsä vaikuttaa lämpötilan paikallisella tasolla (Li et al., 2015)
 - Transpiraatio: veden haihtuminen puista
 - Albedo: pinnan kyky heijastaa auringon säteilyä

Tavoitteet

- Selvittää, onko puuston häviämisellä tilastollisesti merkitsevä vaikutus pintalämpötilaan
- Tutkia, mitkä tekijät vaikuttavat mahdollisen vaikutuksen suuruuteen
 - Vuodenaika, vuorokaudenaika, puulaji, yms.
- Selvittää, kuinka tarkasti vaikutusta voidaan seurata satelliittiperäisiä pintalämpötilamittauksia hyödyntäen

Tutkimusalueet

- 25 tutkimusaluetta Itä- ja Pohjois-Suomesta
 - Kooltaan ~50-200 ha, eli huomattavan isoja avohakkuualueiksi
- Löydetty Metsäkeskuksen metsänkäyttöilmoitusten perusteella
- Jaoteltu mäntyvaltaisiin alueihin (12 kpl) ja sekametsäalueihin (13 kpl)
- Puusto hävinnyt vuosina 2014-2021 avohakkuun tai tuulituhon seurauksena



Tutkimusalueet



Lämpötila-aineistot

- MYD11A1-pintalämpötilatuote (Wan ym., 2021)
 - Perustuu NASA:n AQUA-satelliitin MODIS-sensorin lämpöinfrapunasäteilymittauksiin
 - 1km x 1km resoluutio, päivittäiset havainnot n. klo 13.30 ja 1.30
- Vertailuaineistona sääasemien havaintoihin perustuva Ilmatieteen laitoksen Climgrid-aineisto (Aalto ym., 2016)
 - 1km x 1km resoluutio, sisältää mm. päivän minimi- ja maksimilämpötilan
 - Spatiaalisesti interpoloitu sääasemien havaintojen perusteella, ei huomio kasvillisuutta eli puuston muutoksen vaikutus ei näy
- Muuttuuko pintalämpötilan ja vertailuaineiston keskimääräinen tasoero puuston hävitessä?
- Yksittäisten päivien havaintojen sijaan tarkastellaan vuosittaisia vuodenaikakohtaisia keskiarvoja
 - Marras-maaliskuu=talvi, huhti-toukokuu=kevät, kesä-elokuu=kesä, syys-lokakuu=syksy

Regressiomallit

Ilman metsätyypin vaikutusta:

$$LST = \beta_0 + \beta_1 T_{ilma} + \beta_2 C + \beta_3 W + \beta_4 S + \beta_5 F + \beta_6 (C \times W) + \beta_7 (C \times S) + \beta_8 (C \times F) + \varepsilon \quad (1)$$

- LST : pintalämpötila
- T_{ilma} : ilman lämpötila
- C : indikaattorimuuttuja alueen tilalle, 0=metsäinen, 1=puuton
- W, S, F : indikaattorimuuttujat talvelle, keväälle ja syksyille, 1 jos datapiste kyseiseltä vuodenajalta, 0 muulloin

Regressiomallit

Metsätyypin kanssa:

$$LST = \beta_0 + \beta_1 T_{ilma} + \beta_2 C + \beta_3 W + \beta_4 S + \beta_5 F + \beta_6 L + \beta_7 (W \times L) + \beta_8 (S \times L) + \beta_9 (F \times L) + \beta_{10} (C \times W) + \beta_{11} (C \times S) + \beta_{12} (C \times F) + \beta_{13} (C \times L) + \beta_{14} (C \times W \times L) + \beta_{15} (C \times S \times L) + \beta_{16} (C \times F \times L) + \varepsilon \quad (2)$$

- L : metsätyyppi, 0=mäntymetsä, 1=sekametsä

Tulkinta

- Tutkimuskysymyksen kannalta kiinnostavat vaikutukset mallintuvat sovitettujen regressiokertoimien summana

Esimerkiksi mallin (1) ennustama pintalämpötila talvella

1. Metsäiselle alueelle: $\widehat{LST} = \widehat{\beta}_0 + \widehat{\beta}_3 + \widehat{\beta}_1 T_{ilma}$
 2. Puuttomalle alueelle: $\widehat{LST} = \widehat{\beta}_0 + \widehat{\beta}_2 + \widehat{\beta}_6 + \widehat{\beta}_3 + \widehat{\beta}_1 T_{ilma}$
- Puuston häviämisen vaikutus ilman lämpötilan ollessa vakio: $\widehat{\beta}_2 + \widehat{\beta}_6$

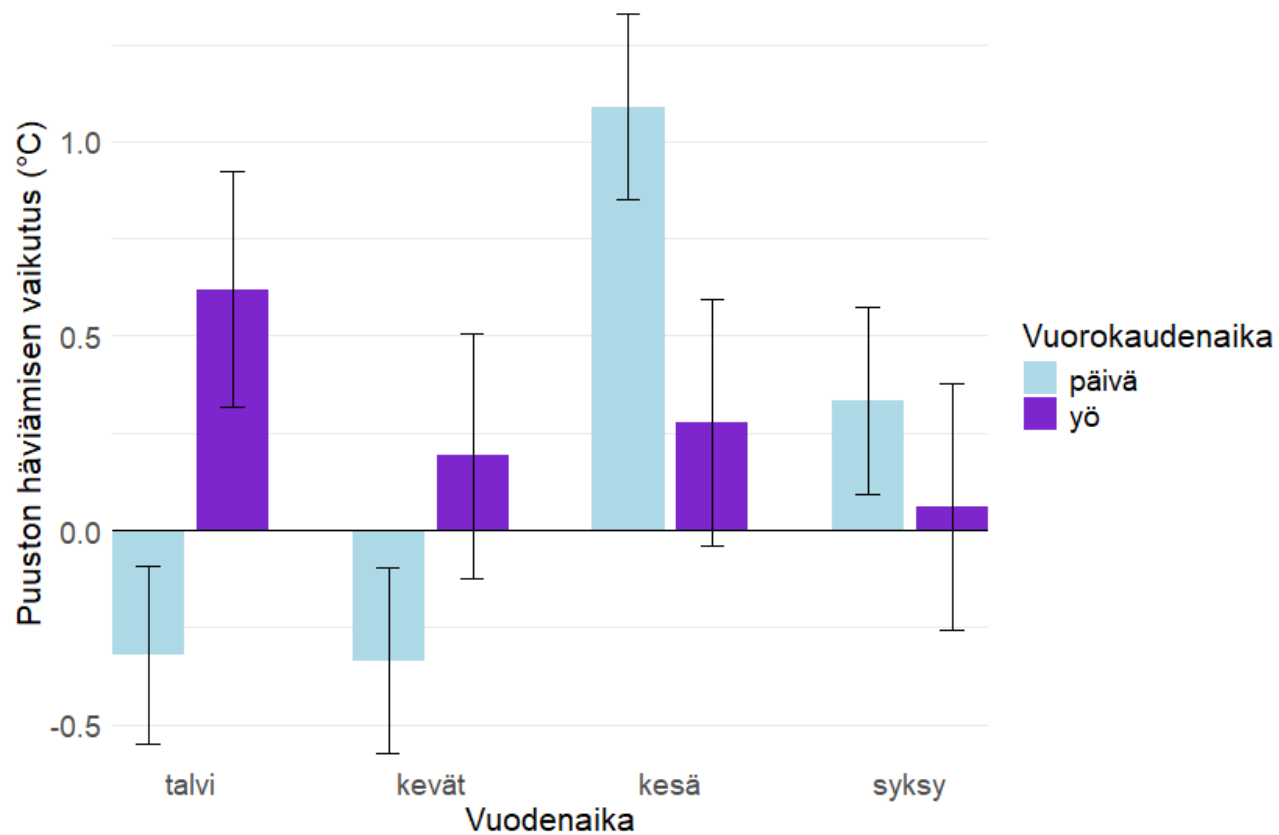
Tilastollinen merkitsevyys

- Poikkeako tiettyjen regressiokertoimien lineaarikombinaatio merkitsevästi nolasta?
- Waldin testi lineaariselle mallille $y = X\beta + \varepsilon$
 - Nollahypoteesi $H_0: R\beta = 0$
 - Nollahypoteesin ollessa voimassa testisuure
$$W = (R\hat{\beta})^T (s_\varepsilon^2 R X^T X R)^{-1} R\hat{\beta}$$
noudattaa khi-neliöjakaumaa
 - Oletus virhetermien ε normaalijakaumasta

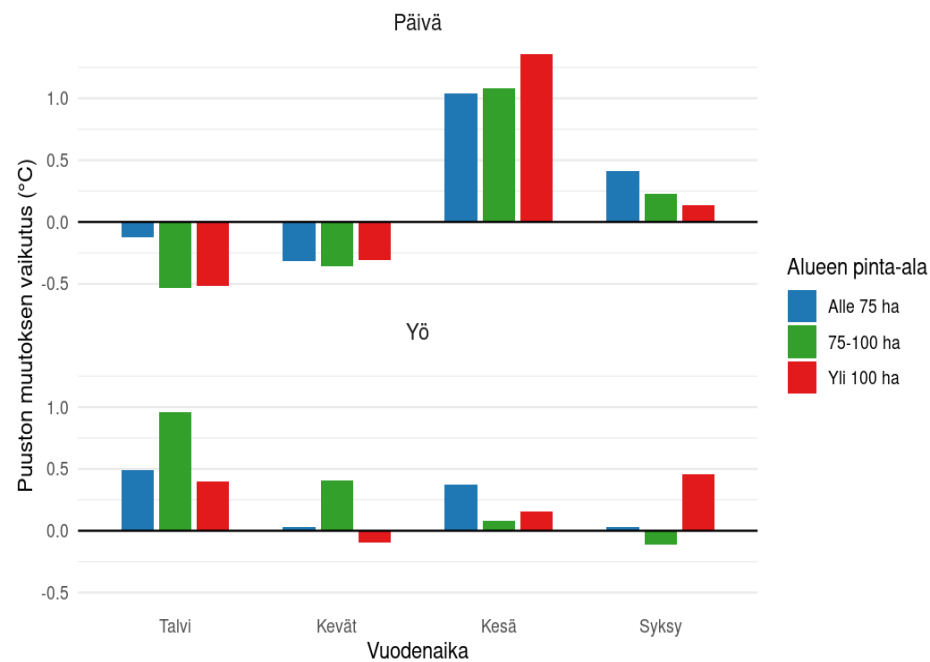
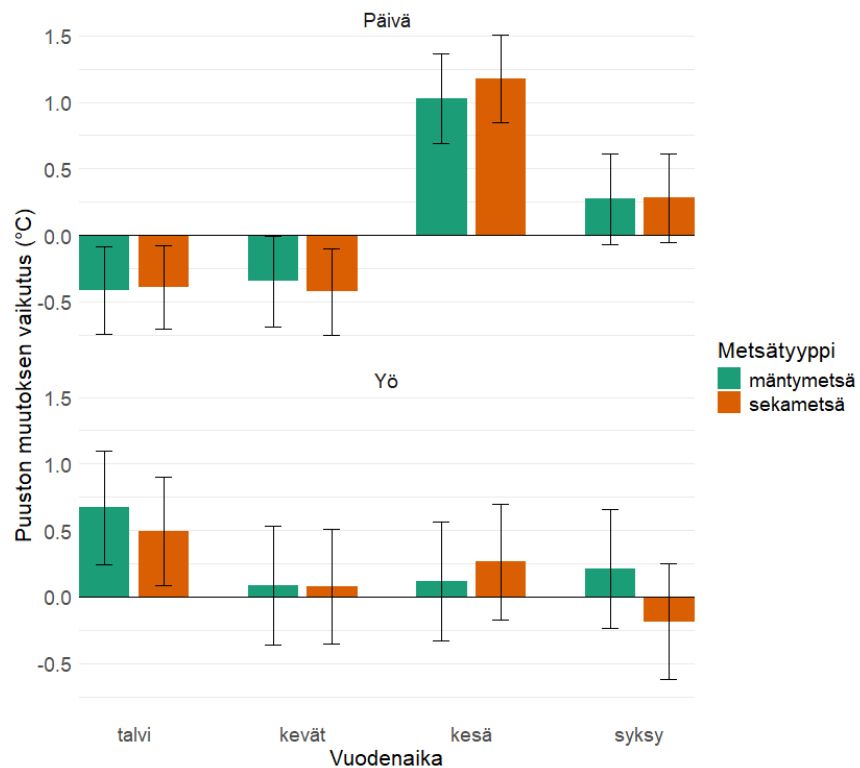
Satelliitin erotuskyky

- Satelliitin resoluutio matala verrattuna tyypillisen hakkuualueen kokoon
 - Kuvapikseli sisältää erityisesti pienimmillä tutkimusalueilla ympäröivää metsää, joka ei häviä
 - Heikentääkö ympäröivä metsä havaittua vaikutusta?
- Jaetaan alueet kolmeen kokoluokkaan
 - <75 , $75-100$ ja >100 ha
- Eroavatko tulokset ryhmien välillä
 - Jos pienemmillä alueilla havaitut muutokset heikompia, syy todennäköisesti satelliittiaineiston resoluutio

Tulokset



Tulokset



Tulokset

- Lämmittävä vaikutus kesäisin ja heikompi syksyisin päiväsaikaan
 - Puiden viilentävä transpiraatio kesäisin voimakkaimmillaan -> puuttomat alueet huomattavasti lämpimämpiä
- Lämmittävä vaikutus talviöisin
 - Syy kaipaa jatkotutkimusta
- Viilentävä vaikutus talvisin ja keväisin päiväsaikaan
 - Paljaalla maanpinnalla metsäalueita yhtenäisempi lumipeite, joka heijastaa auringon säteilyä
- Metsätyyppi ei näytä vaikuttavan lämpötilamuutoksiin
- Alueen koko ei vaikuta systemaattisesti havaintoihin

Tulosten luotettavuus

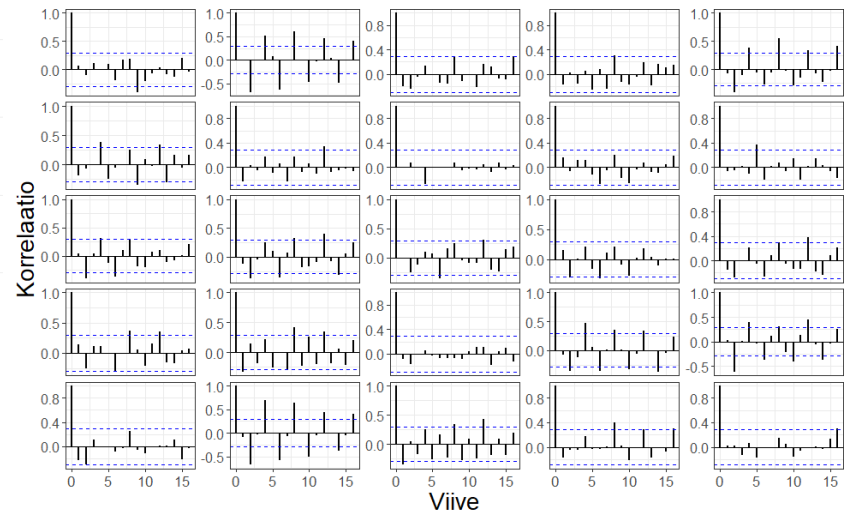
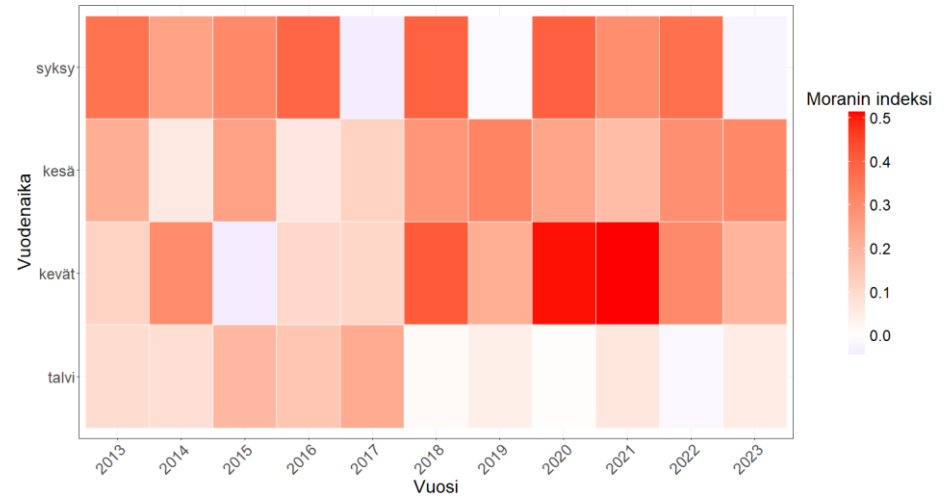
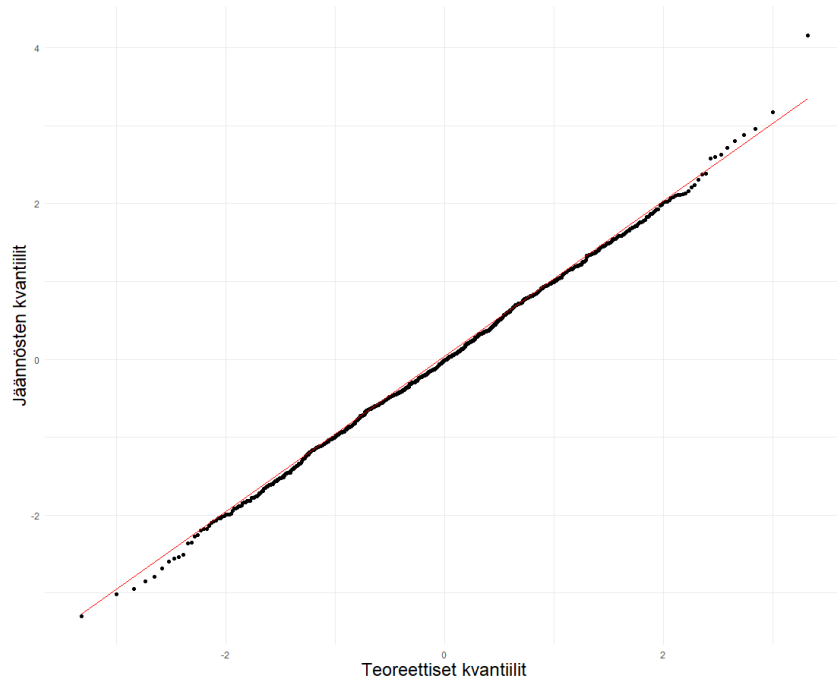
1. Aineistoon liittyvät oletukset

- Sama vuodenaikajako joka alueella, pintalämpötilan ja ilman lämpötilan vastaavuus, metsätyyppiluokittelun tarkkuus

2. Tilastollisten mallien oletukset

- Lämpötila todennäköisesti korreloi sekä läheisten tutkimusalueiden lämpötilojen, että saman alueen aiempien lämpötilojen kanssa
 - Virhetermien korrelaatio voi vaikuttaa estimaattien keskivirheisiin ja täten p-arvojen luotettavuuteen
- Waldin testi olettaa normaalijakautuneet virhetermit
- Estimaatit silti harhattomia

Tulosten luotettavuus



Yhteenveto

- Satelliittiperäiset havainnot käyttökelpoinen keino paikallisten pintalämpötilamuutosten tutkimiseen
- Puuston häviämisellä on selkeä vaikutus metsän pintalämpötilaan erityisesti kesäpäivisin ja talviöisin
- Jatkotutkimuskohteita
 - Lisäselvitystä havaittujen vaikutusten syistä
 - Useampien mahdollisesti pintalämpötilamuutokseen vaikuttavien muuttujien sisällyttäminen (maaperän kosteus, topografia jne.)
 - Menetelmän yleistäminen laajemmalle alueelle
 - Mallinnuksen kehittäminen huomioimaan ajallisia ja spatiaalisia riippuvuuksia

Lähteet

- Luonnonvarakeskus. Hakkuiden kokonaismäärä kasvoi hieman – energiapuun korjuuväheni vuonna 2024, 2025. Saatavissa: <https://www.luke.fi/fi/uutiset/hakkuiden-kokonaismaara-kasvoi-hieman-energiapuun-korjuu-vaheni-vuonna-2024>.
- Yan Li, Maosheng Zhao, Safa Motesharrei, Qiaozhen Mu, Eugenia Kalnay, ja Shuangc-heng Li. Local cooling and warming effects of forests based on satellite observations. Nature Communications, 6(1):6603, 2015.
- Zhengming Wan, Simon Hook, ja Glynn Hulley. MODIS/Aqua Land Surface Temperature/Emissivity Daily L3 Global 1km SIN Grid V061, 2021.
- Juha Aalto, Pentti Pirinen, ja Kirsti Jylhä. New gridded daily climatology of Finland: Permutation-based uncertainty estimates and temporal trends in climate. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 121(8):3807–3823, 2016.