



**TURUN
YLIOPISTO**

Matemaattis-luonnontieteellinen
tiedekunta

Kasvillisuuden vaikutus lämpötilaan kasvukauden aikana Turussa

Laura Koivukoski

Maantiede
LuK-tutkielma
Laajuus: 6 op

30.4.2024

Turku

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu
Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

LuK-tutkielma

Pääaine: Maantiede

Tekijä(t): Laura Koivukoski

Otsikko: Kasvillisuuden vaikutus lämpötilaan kasvukauden aikana Turussa

Ohjaaja(t): Harri Tolvanen

Sivumäärä: 39 sivua

Päivämäärä: 30.4.2024

Kaupunkien lämpötilat poikkeavat usein huomattavasti ympäröivien maaseutualueiden lämpötiloista. Tulevaisuudessa ilmastonmuutoksen ja lämpösaarekkeen vuorovaikutuksen arviointi on haasteellista. Erityisesti kuumien hellejaksojen aikana korkeiden lämpötilojen ja lämpösaarekeilmion vaikutus ihmisten terveyteen on huomattava. Kasvillisuudella on merkitystä lämpötilojen hillitsemisessä kaupunki-ilmastoissa. Tässä tutkimuksessa selvitetään, millainen vaikutus kasvillisuudella on keskilämpötilaan kasvukauden aikana, ja kuinka suuri vaikutus vesialueilla, topografialla ja kaupunkimaisella maankäytöllä on keskilämpötilaan.

Tutkimusaineistoina on käytetty TURCLIM-havaintoverkoston lämpötila- ja kosteusmittauslaitteiden tietoja sekä Sentinel 2 -satelliittikuvista laskettuja normalisoidun kasvillisuusindeksin arvoja. Lämpötiladata koostuu 30 minuutin välein havainnoiduista tiedoista 67 mittauslaitteesta. Normalisoitu kasvillisuusindeksi on selvitetty erikseen jokaisessa havaintopisteessä sekä pikselikohtaisesti että vyöhykekohtaisesti. Kuukausikohtaisten keskilämpötilojen ja normalisoidun kasvillisuusindeksin arvojen välille on laskettu korrelaatiokertoimet vuosien 2020 ja 2021 kasvukausien eri kuukausilta. Korrelaatiokertoimet on laskettu myös kahden hellejakson keskilämpötilana ja normalisoidun kasvillisuusindeksin välille. Lisäksi lineaarisen regressiomallin avulla on tarkasteltu keskilämpötilaan vaikuttavien ominaisuustekijöiden voimakkuutta kasvukauden eri kuukausina. Ominaisuustekijöinä on käytetty normalisoitua kasvillisuusindeksiä, vesialueita, topografiaa ja kaupunkimaisesta maankäytöstä, joiden suhteellista vaikutusta on tutkittu regressiomallin beta-kertoimien avulla.

Tutkimuksen tulokset osoittavat, että keskilämpötilan ja kasvillisuuden välillä on negatiivinen korrelaatio koko kasvukauden ajan. Tämä osoittaa kasvillisuuden viilentävän vaikutuksen suhteessa keskilämpötilaan. Erityisesti hellejaksojen aikana korrelaatio on voimakkaampi kuin suurimmassa osassa kuukausikohtaisia tarkasteluja. Kasvillisuuden viilentävä vaikutus keskilämpötilaan on ominaisuustekijöistä suhteellisesti voimakkain kasvukauden aikana Turun alueella. Kaupunkimaisen maankäytön lämmittävä vaikutus keskilämpötilaan säilyy tasaisena koko kasvukauden ajan, kun taas vesialueiden lämmittävä vaikutus voimistuu kasvukauden loppua kohden. Topografian vaikutus suhteessa keskilämpötilaan on heikoin.

Ilmastonmuutoksen seurauksena sään ääri-ilmiöt lisääntyvät, mikä aiheuttaa esimerkiksi lisääntyviä helleaaltoja ja kuivuutta. Kasvillisuuden viilentävä vaikutus korostuu lämpötilojen nousun myötä. Hellejaksojen aikana havaittu voimakas negatiivinen korrelaatio kasvillisuuden ja keskilämpötilan välillä korostaa kasvillisuuden merkitystä lämpötilan nousun hillitsemisessä ja ihmisten hyvinvoinnin turvaamisessa. Keskeistä on ymmärtää kasvillisuuden ja muiden ominaisuustekijöiden vaikutus kaupunki-ilmastoon, jotta voidaan kehittää kestäviä ratkaisuja kaupunkiympäristön parantamiseksi. Tämä on tärkeää, sillä kaupunkien paikallisilmasto vaikuttaa merkittävästi kasvavan kaupunkiväestön elinympäristön laatuun.

Avainsanat: kaupunki-ilmasto, lämpötila, normalisoitu kasvillisuusindeksi, vesialueet, topografia, maankäyttö, lineaarinen regressio

Sisällysluettelo

1	Johdanto	4
2	Tutkimuksen tausta ja teoreettinen viitekehys	6
2.1	Kaupunki-ilmastojen lämpötilojen tutkimus	6
2.2	Kasvillisuuden ja lämpötilan vuorovaikutus	7
2.3	Muiden tekijöiden vaikutus lämpötilaan	9
2.3.1	Vesialueiden vaikutus lämpötilaan	9
2.3.2	Topografian vaikutus lämpötilaan	10
2.3.3	Maankäytön vaikutus lämpötilaan	12
2.4	Turun alueen ilmaston ja maanpeitteen ominaispiirteet	13
3	Aineistot ja menetelmät	15
3.1	Aineistot	15
3.1.1	TURCLIM-lämpötiladata havaintopisteistä	15
3.1.2	TURCLIM-havaintopisteiden ominaisuustiedot	15
3.1.3	Normalisoitu kasvillisuusindeksi kasvillisuuden tilan mallintajana	16
3.2	Analyysimenetelmät	18
3.2.1	Korrelaatiokertoimet	18
3.2.2	Lineaarinen regressiomalli	19
4	Tulokset	21
4.1	Pikselikohtainen lämpötilan ja kasvillisuuden välinen korrelaatio	21
4.2	Vyöhykekohtainen keskilämpötilan ja kasvillisuuden välinen korrelaatio	22
4.3	Kasvillisuuden vaikutus hellejaksojen keskilämpötilaan	23
4.4	Ominaisuustekijöiden vaikutus keskilämpötilaan	24
5	Keskustelu	27
5.1	Kasvillisuuden vaikutus lämpötilaan kasvukauden aikana	27
5.2	Vesialueiden, topografian ja maankäytön vaikutus lämpötilaan	30
6	Johtopäätökset	35
	Lähteet	36

1 Johdanto

Kaupunkialueet ovat yleensä lämpimämpiä kuin niitä ympäröivät alueet, ja lämpötilaeron odotetaan kasvavan kaupunkikehityksen myötä (Zhou ym. 2016; Krayenhoff ym. 2021). Ilmastonmuutoksen ja lämpösaarekkeen välistä vuorovaikutusta on hankala arvioida, ja sekä lämpösaarekkeen heikkenemisestä (Oleson ym. 2011) että vahvistumisesta on tehty arvioita (Wilby 2007). Lämpötilojen kasvu vaikuttaa ihmisten terveyteen, mikä on seurausta lämpötilan ja sademäärän muutoksista (Bowler ym. 2010). Onkin todennäköistä, että kaupungin lämpösaareke pahentaa kuumuuden aiheuttamia terveyshaittoja tulevaisuudessa, kun ilmasto lämpenee.

Ilman lämpötilan nousu on ongelmallista kaupunkialueilla, joissa lämpötila on jo nyt muutaman asteen lämpimämpi kuin ympäröivillä maaseutualueilla (Bowler ym. 2010). Tätä kaupunki- ja maaseutualan välistä lämpötilaeroa kutsutaan lämpösaarekeilmioiksi. Se on voimakkaimmillaan heikkojen tuulten ja selkeän sään aikana, kun pitkäaaltoinen säteilyhäviö on suurimmillaan (Holden 2017: 243). Kaupunkialueilla säteilyn ja energian virtauksissa ilmenee muutoksia, kun kaupunkirakenne absorboi voimakkaasti auringon säteilyä, ja ilmakehään vapautuu merkittävästi energiaa kotitalouksien ja teollisuuden lämmitysvaikutuksista.

Kasvillisuudella on merkittävä rooli maanpäällisessä ekosysteemissä, sillä se yhdistää ilmakehän, hydrosfäärin ja maaperän toisiinsa (Wang ym. 2022). Kasvillisuuden kasvuun vaikuttavat paikalliset ilmasto-olosuhteet, kuten lämpötila, kosteus ja auringon säteily. Kasvillisuuden kasvua rajoittavat ilmaston ääri-ilmiöt, kuten korkea lämpötila, vähäinen sademäärä ja kuivuus. Kaukokartoitusaineiston, kuten satelliittikuvien avulla laskettava normalisoitu kasvillisuusindeksi (NDVI) mahdollistaa kasvillisuuden kasvun arvioimisen ja alueellisten muutosten seurannan kasvillisuuden tilassa (Pei ym. 2019). Ilmastonmuutoksen vaikutusten lieventämiseksi on tärkeää tutkia kaupunki-ilmastoja, joissa kasvillisuuden viilentävällä vaikutuksella on keskeinen merkitys (Krayenhoff ym. 2021).

Kasvillisuuden lisäksi maankäyttö, topografia ja vesialueet vaikuttavat lämpötilaan (Suomi 2014). Tämä havaitaan myös Turun alueella, jossa tämä tutkielma on toteutettu. Näiden tekijöiden vaikutus vaihtelee sekä vuorokauden- että vuodenaikojen mukaan (Suomi & Käyhkö 2012). Lämpösaarekkeen ydinaluetta on keskusta-alueella sijaitseva Kauppatorin ympäristö.

Turun sijainti rannikolla tuo esiin huomattavan vuodenaikaisvaihtelun vesialueiden vaikutuksessa, kun taas maankäytön ja topografian vaikutus on vakaampi vuodenajasta toiseen.

Ilmastonmuutoksen myötä kaupunki-ilmastoista tarvitaan enemmän tutkimusta ilmiön vaikutusten selvittämiseksi. Vaikka lämpötilaan vaikuttavia tekijöitä on tutkittu Turun alueella, suurin osa tutkimuksista on keskittynyt muihin kuin kasvillisuuteen liittyviin tekijöihin. Tämän tutkielman tavoitteena on selvittää, millainen vaikutus kasvillisuudella ja muilla ominaisuustekijöillä on paikallisilmastoon Turun alueella vuosien 2020 ja 2021 kasvukausien aikana. Tutkimuskysymykseni ovat seuraavat:

1. Miten TURCLIM-havaintopisteiden keskilämpötilat korreloivat normalisoidun kasvillisuusindeksin arvojen kanssa mittauspisteessä ja sen lähiympäristössä kasvukauden eri kuukausina?
2. Millainen kasvillisuuden vaikutus lämpötilaan on hellejaksojen aikana?
3. Millainen vaikutus vesialueilla, topografiassa ja maankäytöllä on mittauspisteen keskilämpötilaan kasvukauden aikana Turun alueella?

2 Tutkimuksen tausta ja teoreettinen viitekehys

2.1 Kaupunki-ilmastojen lämpötilojen tutkimus

Kaupunki-ilmasto eroaa huomattavasti ympäröivän alueen ilmastosta ja on seurausta ihmisen toiminnasta, erityisesti kaupungin rakenteista (Drebs 2011). Kaupunki-ilmaston tutkimus edustaa monitieteistä luonnontieteellistä tutkimusta, jonka tarkoituksena on kuvata, analysoida ja ennustaa alueen fysikaalisia ominaisuuksia (Drebs ym. 2023). Sen vaikutusalue on yhdestä kilometristä sataan kilometriin, jolloin puhutaan mesoskaalan ilmastosta. Kyseessä on laaja ja moniulotteinen ilmiö, jossa energiasäteilyn osatekijät, tuuli, ilman lämpötila, kosteus ja ilman epäpuhtaudet ovat vuorovaikutuksessa keskenään. Lämpötilavaihteluita pyritään ymmärtämään eri ympäristötekijöiden, kuten maankäytön, topografian ja vesistöjen, vaikutuksia selvittämällä.

Kaupunki-ilmaston erityispiirre on lämpösaarekeilmiö, jossa ilman lämpötila on korkeampi kaupunkialueilla suhteessa maaseudun alueisiin (Suomi & Käyhkö 2012). Toisinaan päiväsaikaan kaupunkialueet voivat kuitenkin olla kylmempiä kuin ympäröivä maaseutu, jolloin on kyse kylmäsaarekkeesta (Oke 1987). Lämpösaarekkeen voimakkuus riippuu auringon lämmön varastoitumisen sekä ihmisen aiheuttaman lämmön vapautumisen ja haihtumisen eroista kaupunki- ja maaseutualueiden välillä. Paikalliseen ilmastoon vaikuttavat kaupunkitekijöiden lisäksi topografia ja vesistöt, minkä vuoksi on haastavaa havaita ainoastaan kaupungin aiheuttamaa vaikutusta. Lisäksi kasvillisuudella on suuri merkitys lämpötilojen vaihtelussa erityisesti kaupunki-ilmaston lämpenemisen hillitsemisen näkökulmasta (Yang ym. 2022). Koska yhä useammat ihmiset asuvat kaupunkialueilla, on seurattava kaupunkialueiden ilmastoa ja erityisesti lämpötilaa, jotka ovat keskeisiä kaupunkien kestävyys- ja asukkaiden terveyden kannalta.

Turun paikallisilmastoa on tutkittu eri tutkimusmenetelmillä vuodesta 2005 alkaen (Drebs ym. 2023). Tutkimukset perustuvat TURCLIM-havaintoverkostoon, joka perustettiin vuonna 2001 Turun yliopiston maantieteen laitoksella. Havaintopisteistä saadaan tietoa ilman lämpötilasta ja suhteellisesta kosteudesta 83 eri mittauspisteestä puolen tunnin välein. Tässä tutkielmassa käytettiin 67 mittauspisteen lämpötilahavaintoja. On havaittu, että suurin vaikutus alueellisiin lämpötilaeroihin Turussa on havaittu olleen maankäytöllä ja kaupunkialueiden eri maankäyttöluokkien lämmitysvaikutuksilla (Suomi & Käyhkö 2012). Vesistöjen vaikutus

korostuu syksyllä ja keväällä, kun taas topografian vaikutus on suurimmillaan inversiotilanteissa. Lämpötilojen vaihtelu on huomattavaa eri puolella mittauspisteiden havaintoverkoston lämpösaarekeilmion, kasvillisuuden, maankäytön, vesistöjen läheisyyden ja topografian vuoksi. Osatekijöiden vaikutukset vaihtelevat vuodenaajasta, vuorokaudenaajasta ja säätilasta riippuen, kun niiden voimakkuus, suunta ja alueellinen ulottuvuus vaihtelevat (Suomi 2022).

2.2 Kasvillisuuden ja lämpötilan vuorovaikutus

Kasvillisuudella on tärkeä merkitys maanpäällisessä ekosysteemissä, sillä se yhdistää maaperän, hydrosfäärin ja ilmakehän toisiinsa (Wang ym. 2022). Kasvillisuus edistää materiaalin siirtymistä ja energian vaihtoa, mikä on hyödyllistä ilmaston säätelylle, hiilen kierrolle ja maaperän suojelulle. Merkitys korostuu globaalin hiilitaseen säätelyssä, sillä kasvillisuus sitoo hiiltä fotosynteesin avulla. Kasvukauden aikana kasvillisuuden määrä lisääntyy lämpötilan, kosteuden ja auringon säteilyn muutosten vaikutuksesta. Kasvillisuuden määrän kasvua rajoittavat tietyt ilmaston ääri-ilmiöt, kuten korkea lämpötila, vähäinen sademäärä ja kuivuus, joiden välillinen vaikutus ulottuu myös ihmisten terveyteen ja hyvinvointiin (Zhou ym. 2016).

Kasvukaudeksi määritellään se osa vuodesta, jolloin vuorokauden keskilämpötila on yli viisi astetta (Ruosteenoja ym. 2016). Koska kasvukausi kestää Turussa huhti-toukokuun vaihteesta syyskuun loppuun asti, on kasvukausi noin viiden kuukauden mittainen ja sinä aikana kasvillisuuden vaikutus lämpötiloihin on suurimmillaan. Hemiborealisella vyöhykkeellä kasvukauden aikana kasvillisuuden määrä lisääntyy heinä-elokuuhun asti, minkä jälkeen syyslokakuussa lehdet alkavat kellastua ja pudota (Käyhkö & Skånes 2008; Rautiainen ym. 2008). Toisin kuin havupuilla, koivulla ja muilla saman vyöhykkeen lehtipuulajeilla on erilaiset kasvun vaiheet silmujen puhkeamisesta lehtien putoamiseen, mikä vaikuttaa kasvillisuuden määrään vuodenaikojen mukaan.

Viimeaikaiset tutkimukset ovat osoittaneet, että kasvillisuuden lisääminen on tehokas toimenpide lieventää ylimääräisen lämmön vaikutuksia sekä viilentää ilman ja maanpinnan lämpötilaa kaupunkialueilla (Yang ym. 2022). Kaupunkialueiden kasvillisuus lisää haihtumiseen käytettävää energiaa, niin kutsuttua latenttia lämpövirtaa, joka vähentää ylimääräistä energiaa. Tämä haihtuu lopulta lämpövirtana, mikä johtaa siihen, että ilman ja maanpinnan lämpötilat laskevat. Kaupunkien keskustoissa vihreään infrastruktuuriin

lukeutuvat puut, pensaat ja ruohikot saavat aikaan viilentävän vaikutuksen heijastamalla auringon säteilyä pois kaupunkiympäristöstä tai ohjaamalla absorboitua aurinkoenergiaa latentiksi lämmöksi (Lin ym. 2008; Krayenhoff ym. 2021). Puiden viilentävä vaikutus mikroilmastoon on tehokkaampi kuin pensaiden tai ruohikoiden (Lin ym. 2008). Kaupunkien kasvillisuus on kriittinen tekijä kaupunkien ja maaseudun lämpötilaerojen ehkäisyssä erityisesti hellejaksojen aikana, koska kaupungeissa korkeat lämpötilat vaikuttavat haitallisesti terveyteen, yleiseen viihtyisyyteen ja energiankulutukseen lämpiminä vuodenaikoina (Krayenhoff ym. 2021; Yang ym. 2022).

Kaupunkialueilla kasvillisuus alentaa lämpötilaa evapotranspiraation avulla, joka lisääntyy kasvillisuuden osuuden kasvaessa (Yang ym. 2022). Evapotranspiraatio tarkoittaa kokonaishaihduntaa, joka koostuu kaikesta ilmakehään haihtuvasta vedestä (Brutsaert 2005: 2). Evapotranspiraation heikkeneminen vähentää piilevää lämmönkulutusta, mikä johtaa tuntevan lämmön määrän lisääntymiseen ja siten korkeampiin maanpinnan lämpötiloihin (Qiu ym. 2013). Ero kasvillisuutta ja erilaista maankäyttöä sisältävän ympäristön lämpötiloissa voi toimia indikaattorina kaupunkikasvillisuuden viilentävälle vaikutukselle (Yang ym. 2022). Kasvillisuuden viilentävä vaikutus ei rajoitu ainoastaan kasvillisuuden määrään vaan myös taustalla oleviin ilmasto-olosuhteisiin ja kasvillisuuden alueelliseen jakautumiseen. Tämä on huomioitava, kun vertaillaan kasvillisuuden jäähdytysvaikutuksia kaupunkialueilla.

Normalisoitu kasvillisuusindeksi (NDVI) kuvastaa alueellisen kasvillisuuden peittävyden laajuutta ja kasvillisuuden tilaa (Wang ym. 2022; kaava 1). NDVI-indeksiä voidaan käyttää indikaattorina ekosysteemien ja alueellisten kasvillisuuden muutosten seurannassa. Se voidaan laskea seuraavasti:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{RED}}{\text{NIR} + \text{RED}}, \quad (1)$$

jossa NIR on lähi-infrapunasäteilyn heijastuvuus ja RED on näkyvän punaisen valon heijastuvuus (Holden 2017: 715). Indeksillä perustuu kaukokartoitushavaintoihin kaupunkipintojen radiometrisistä pintalämpötiloista, joiden avulla voidaan seurata kasvillisuuden vaikutusta kaupunkien ympäristöön (Wang ym. 2022). Kuukausittaisen NDVI-indeksin suuruus ja sen muutos ajan myötä ovat tärkeitä indikaattoreita, jotka kuvaavat kasvillisuuden aktiivisuutta eri kuukausina (Piao ym. 2003). Kaupunkialueilla kasvillisuuden

haihtumisnopeus korreloi kaupunkirakenteen materiaalien kanssa, ja kasvillisuudella on huomattavia vaikutuksia esimerkiksi maanpinnan lämpötilaan ja ilmastoon (Yang ym. 2022) Siksi kaupunkisuunnittelussa on otettava huomioon kasvillisuuden viilentävä vaikutus.

Satelliittihavainnot tarjoavat laajan tietokannan maanpäällisen biosfäärin dynamiikan arvioimiseksi, koska satelliittihavainnoilla on lyhyet tarkastelujaksot ja ne kattavat koko maailman (Cramer ym. 1999; Piao ym. 2003). Aiemmat tutkimukset normalisoidun kasvillisuusindeksin arvojen vaihteluista ovat osoittaneet, että kasvukausi on pidentynyt ja fotosynteesin aktiivisuus lisääntynyt pohjoisilla leveysasteilla viime vuosikymmenten aikana (Myneni ym. 1997; Kawabata ym. 2001; Piao ym. 2003). NDVI-indeksi kasvaa kuukausitasolla lämpötilan ja sademäärän kasvaessa, kunnes se saa maksimiarvonsa kesän aikana. Keskiläyeyksien alueilla, jossa aiheeseen liittyvää tutkimusta on tehty enemmän, kasvillisuuden arvot nousevat huippuunsa kasvukauden keskellä, kun taas suhteellisesti suurin NDVI-indeksin kasvu tapahtuu aikaisin kasvukauden alkupuolella huhti-toukokuussa (Piao ym. 2003). Runsas kasvillisuus parantaa paikallista ekosysteemin vakautta, mikä voi vähentää esimerkiksi maaperän eroosiota (Arsenault ym. 2005; Hao ym. 2008). NDVI-indeksin vuotuinen vaihtelu ja sen yhteys ilmastoon ovat avainasemassa, jotta voidaan ymmärtää ilmaston vaikutusta kasvillisuuden aktiivisuuteen, hydrologiseen kiertoon, hiilen kiertoon (Piao ym. 2003).

2.3 Muiden tekijöiden vaikutus lämpötilaan

2.3.1 Vesialueiden vaikutus lämpötilaan

Kasvillisuuden lisäksi myös muut tekijät vaikuttavat kaupunkialueen lämpötilaan eri vuorokauden- ja vuodenaikoina (Suomi & Käyhkö 2012: 461). Suurten vesistöjen, kuten merialueiden tai järvien, läheisyydessä vaikutus ilmastoon on huomattava sekä alueellisesti että paikallisesti (Väyrynen ym. 2017: 369). Ilmaston vaikutus vaihtelee myös ajallisesti päivä- ja yöaikaan sekä eri vuodenaikoina. Tyypillisesti suuri vesistö hillitsee paikallisia lämpötilaolosuhteita nostamalla keskimääräisiä minimilämpötiloja ja alentamalla keskimääräisiä maksimilämpötiloja. Vesikerroksen lämmittämiseen tarvitaan enemmän aurinkoenergiaa kuin vastaavan maakerroksen. Myös veden kierto ja sekoittuminen siirtävät lämpöä kauemmaksi pinnasta. Vesi lämpenee 30 metrin syvyyteen asti ja osallistuu aktiivisesti vuorokautiseen lämmönvaihtoon ja -varastointiin. Vesistöjen suuri lämpökapasiteetti pienentää yleensä lämpötilojen vaihtelua rannikkoalueilla verrattuna mannermaisiiin alueisiin (Suomi

2014: 27). Kyseinen vaikutus voidaan havaita Turussa, jossa Itämeren vaikutus on merkittävä alueen ilmastoon.

Vesistöt joko vahvistavat tai heikentävät lämpösaarekkeen voimakkuutta vuodenajan mukaan (Suomi 2014: 27). Kausittainen jääpeite talvella muuttaa vesistöjen vaikutusta paikallisilmastoon kesään verrattuna. Jäällä ja lumella onkin huomattava vaikutus globaaliin ilmastojärjestelmään, mikä tekee niistä merkittävän ilmasto muokkaavan tekijän (Väyrynen ym. 2017). Jääpeitteen aikana veden ja ilmakehän väliset turbulenssiset lämpövirrat vaimenevat, ja lämmönsiirtoa tapahtuu ainoastaan johtamalla jään ja lumen läpi. Tämä johtaa siihen, että jää ja lumipeite vähentävät selvästi alapuolella olevan veden lämpövaikutusta (Suomi ym. 2012; Väyrynen ym. 2017). Paksun jään aikana vesistöt voivatkin olla mikroilmastoltaan kaikkein kylmimpiä paikkoja.

Turussa Itämeren vaikutus havaitaan lämpötilojen vaihtelussa vuodenaikojen mukaan. Itämeri on puoliksi suljettu, suhteellisen matala, murtovesipitoinen sisämeri (Väyrynen ym. 2017: 370). Se jäätyy osittain talvisin, ja on yhteydessä Pohjanmereen Tanskan salmien kautta. Turussa vallitsevat joko mannermaiset tai merelliset piirteet, jotka vaihtelevat suurten sääjärjestelmien sijainnin ja liikkeiden mukaan (Suomi & Käyhkö 2012: 106). Vesistöjen vaikutus ilmenee suhteellisesti lämpimämmän alueen siirtymisenä kausittain. Keväällä vuorokauden maksimilämpötilat havaitaan sisämaan maaseutualueilla, kun taas kaupunkien keskusta-alueilla voidaan havaita kylmäsaareke. Syksyllä vesistöjen korkea lämpötila johtaa lämpimien alueiden siirtymisen niille alueille, jotka ovat alttiimpia merialueiden lämmittävälle vaikutukselle. Merijääpeitteen laajuus vaikuttaa ilmastoon alueellisesti ja ajallisesti. Se estää lämmön ja vesihöyryn siirtymisen pois merestä. Tällöin kaupunkialueesta tulee mannermaisempi normaaliin tilanteeseen verrattuna.

2.3.2 Topografian vaikutus lämpötilaan

Kaupunkien lämpötiloja koskevat tutkimustarpeet perustuvat kasvillisuuteen, vesistöjen vaikutukseen, kaupungin rakenteeseen ja topografiaan. Topografian vaikutus on otettava huomioon myös kaupungeissa, joissa maaston vaihtelut ovat vähäisiä (Goldreich 1984). Goldreichin (1984) mukaan kaupungit voidaan luokitella topografioidensa mukaan neljään eri luokkaan: kaupunkeihin laaksoissa, kaupunkeihin rinteillä, kaupunkeihin mäkien päällä ja korkeassa ilmanalassa sijaitseviin kaupunkeihin. Lisäksi tasaisella maalla sijaitsevat kaupungit,

kuten Turku, voidaan ottaa huomioon luokituksessa. Näissä luokissa esimerkiksi tuulen voimakkuus ja suunta, pilvisuus, kosteus ja korkeus merenpinnasta vaikuttavat kaupunkien ilmastoon (Goldreich 1984; Gentili ym. 2019: 24).

Lämpötilan alueelliseen vaihteluun vaikuttavat topografiset ominaisuudet ja ilmakehän kerrostuneisuus (Väyrynen ym. 2017: 370). Yleisesti normaalien ilmakehäolosuhteiden aikana lämpötilavaihtelut ovat merkittäviä vain topografisesti vaihtelevilla alueilla. Kuitenkin inversiotilanteen aikana lämpötilaerot voivat olla huomattavia, vaikka korkeuserot ovat pieniä (Goldreich 1984). Inversiotilanteessa ilmakehässä normaalisti tapahtuva lämpötilan lasku korkeuden kasvaessa kääntyy päinvastaiseksi (Holden 2017: 197). Tämä tarkoittaa sitä, että ylempänä ilmakehässä on lämpimämpää kuin alapuolella.

Laaksoissa sijaitsevat kaupungit eivät ole yhtä herkkiä yöllisille inversioille kuin maaseutualueet laakson pohjalla (Suomi 2014). Suomen (2014) mukaan rakennukset toimivat mekaanisina esteinä hidastaen kylmän ilman valumista rinnettä alaspäin. Myös kaupungin pinnoista aiheutuva lämpövuoto ja kaupungin rajakerros (engl. *urban canopy layer*) estävät osittain laaksoinversion kaupunkialueella. Föhn-tyyppiset tuulet voivat vaikuttaa rinteillä sijaitsevien kaupunkien lämpösaarekkeeseen (Goldreich 1984). Laskeutuva ilma lämpenee adiabaattisesti tuulenpuoleisella rinteellä, mikä voi heikentää tai vahvistaa kaupungin lämpösaarekettä (Suomi 2014). Kaupungin yli puhaltavat lämpimät tuulet voivat aiheuttaa inversion tai vahvistaa olemassa olevaa inversiota. Ne voivat heikentää tai hajottaa lämpösaarekettä verrattuna korkeammalla sijaitseviin alueisiin.

Mäkien päällä sijaitsevat kaupungit eivät ole yhtä hyvin tuulelta suojassa kuin laaksoissa sijaitsevat kaupungit (Suomi 2014). Kuitenkin heikolla tuulella lämpösaareke voi olla voimakas, kun ympäröivillä maaseutualueilla vallitsee inversio. Tällöin kaupungin lämpösaarekkeen voimakkuus kasvaa. Korkeassa ilmanalassa sijaitseville kaupungeille on tyypillistä voimakkaat yölliset inversiot ja selkeä päivittäinen lämpötilarytmi (Goldreich 1984: 354).

Aiempiin tutkimuksiin perustuen topografian vaikutus lämpötilaeroihin Turussa on heikompi kuin vesistöjen tai maankäytön. Vaikutus lämpötiloihin korostuu kuitenkin inversiotilanteessa (Goldreich 1984). Topografian vaikutus ei ole samanlainen kaupunki- ja maaseutualueilla. Matalalla sijaitsevat maaseutualueet ovat alttiimpia kylmien ilmassojen valumiselle kuin

vastaavat kaupunkialueet, mikä voidaan havaita myös Turussa (Kuttler ym. 1996; Suomi 2014: 56). Kaupungin vertikaalisten ja horisontaalisten pintojen mosaiikki heikentää rinteiden suunnan ja kaltevuuden vaikutusta auringon säteilylle altistumisessa (Suomi 2014: 56). Lisäksi Turussa ei ole merkittäviä topografian aikaansaamia paikallisia tuulia, jotka vahvistaisivat rinteiden vaikutusta.

2.3.3 Maankäytön vaikutus lämpötilaan

Kaupunkien lämpötiloihin vaikuttaa merkittävästi maankäyttö, joka on myös yksi laajimmin ilmakehän toimintaan vaikuttavista tekijöistä (Oke 1973: 769). Maankäytön muutokset kaupunkialueilla aiheuttavat biodiversiteetin heikkenemistä, paikallisilmaston muuttumista ja lämpösaarekkeiden kehittymistä (Koko ym. 2021). Nämä ilmiöt voivat johtaa ilmanlaadun heikkenemiseen, vesivarojen vähentymiseen, lisääntyneeseen energiankulutukseen ja ihmisten terveyteen kohdistuviin haitallisiin vaikutuksiin.

Kaupungin lämpösaarekkeen vaikutus korostuu usein öisin, kun on selkeää ja tuuli on heikko (Väyrynen ym. 2017: 370). Lämpösaareke aiheutuu tyypillisesti maankäytöstä. Tämä maankäyttö koostuu rakennusmateriaaleista, jotka varastoivat ja vapauttavat hyvin lämpöä. Lisäksi lämpösaarekkeen muodostumiseen vaikuttavat ihmistoiminnan synnyttämä hukkalämpö, joka syntyy liikenteestä ja rakennuksista, sekä eroavaisuudet haihdunnassa kaupunkialueiden ja muiden alueiden välillä.

Eri maankäyttöluokilla on erilaiset tuntuvan ja piilevän lämmön vapautumisominaisuudet (Wang ym. 2023). Nämä ominaisuudet johtuvat eroista maanpinnan fysikaalisissa ominaisuuksissa, jotka vaikuttavat maanpinnan energiataseeseen. Tämä vaikuttaa puolestaan ilmakehän rajakerroksen dynamiikkaan ja termiseen vuorovaikutukseen, mikä aiheuttaa muutoksia lämpötiloissa, kosteudessa ja sademäärissä. Turussa maankäytön vaikutusta lämpötiloihin on tutkittu SLICES-maankäyttöluokituksella, joka on alueiden käyttöä, peitteisyyttä, maaperää sekä erityiskäyttö- ja käyttörajoitusalueita kuvaava paikkatietoaineisto (Suomi 2014; SLICES 2010... 2020). Maankäyttöä arvioimalla voidaan erottaa todellinen kaupungin vaikutus muista paikallisilmastoon vaikuttavista tekijöistä. Näin on mahdollista arvioida maankäytön itsenäistä vaikutusta ja mallinnuskykyä eri maankäyttöluokkien sekä niiden yhdistelmien osalta (Suomi 2014).

Kaupungin pintojen hidas lämpeneminen johtuu rakennusten varjostusvaikutuksesta ja rakennusmateriaalien kyvystä varastoida aurinkoenergiaa (Suomi & Käyhkö 2012). Turussa tämä aiheuttaa kaupunkialueella keskipäivällä kylmäsaarekkeen, ja heti kaupungin keskustan ulkopuolella korkeampia lämpötiloja. Vuorokausitasolla kaupunkialueiden maankäyttö nostaa päivittäisiä minimi- ja maksimilämpötiloja, ja siten myös vuorokauden keskilämpötiloja (Suomi 2014). Etenkin keväällä ja kesällä havaittu kylmäsaareke viittaa kaupunkialueiden lämpöinertiaan. Tämä tarkoittaa materiaalin kykyä säilyttää lämpötilansa suurten vuorokautisten lämpötilaerojen aikana, ja korostaa auringonsäteilyn merkitystä tärkeänä ilmastollisena tekijänä. Siten kaupunkialueiden vaikutus ei ole lämmittävä koko vuorokauden ajan. Tämä johtuu siitä, että lämpöinertia on niin voimakas, mikä hidastaa erityisesti keväällä ja kesällä kaupunkien lämpenemistä aamupäiväisin.

2.4 Turun alueen ilmaston ja maanpeitteen ominaispiirteet

Tutkimusalue koostuu Lounais-Suomessa sijaitsevasta Turun kaupungista ja osista sen naapurikuntia, joissa Itämeri ja monipuolinen topografia yhdessä kaupungin vaikutuksen kanssa aiheuttavat kausittain vaihtelevan ilmaston (Alvi ym. 2022). Lähellä Turun keskustaa sijaitseva saaristo vaikuttaa ilmastoon, joka on sekoitus rannikon ja sisämaan ilmastotyyppiä (Suomi ym. 2012: 106). Talvella meren jääpeite rajoittaa vesihöyryn ja lämmön siirtymistä maalle, jolloin alueen ilmasto muuttuu mannermaisemmaksi. Ilmastolle tyypillistä ovat suhteellisen lämpimät kesät ja lyhyet lauhat talvet (Kersalo & Pirinen 2009). Kevät alkaa huhtikuussa, kun lumi sulaa, ja kasvukausi pian sen jälkeen, kun vuorokauden keskilämpötila ylittää 5 °C.

Suomi kuuluu Köppen–Geigerin ilmastoluokituksen Dfb- ja Dfc-ilmastotyyppisiin ja Itämeren eteläisellä rannikkoalueella sijaitseva Turku ainoastaan Dfb-tyyppiin (Peel ym. 2007). Ilmastollisen vertailukauden 1981–2010 perusteella Turun vuotuinen sademäärä on 720 mm ja keskilämpötila noin 5,5 °C (Väyrynen ym. 2017: 371; Alvi ym. 2022). Tutkimuksessa käytettävät 67 havaintopistettä sijaitsevat pääasiassa Turun alueella (59), mutta myös muutama havaintopiste on Liedossa (3), Kaarinassa (3) ja Raisiossa (2). Lämpötilahavaintojen mittausverkosto on tihein Turun kaupungin keskustassa, ja kauempana se harvenee vähitellen.

Tutkimusalueen maanpeite koostuu monenlaisista pintatyypeistä, kuten kaupunkimaisesta maankäytöstä ja Itämeren ranta-alueesta monimutkaisine saaristoineen, jossa on useita metsätyyppejä boreaalisista havu- ja sekametsistä Ruissalon tammimetsiin (Käyhkö & Skånes

2008). Aurajoki virtaa Turun läpi, ja suurin osa kaupunkialueen puistoista sijaitsee joen kaakkoispuolella. Teollisuusalueet sijaitsevat hajallaan keskusta-alueen länsi- ja pohjoispuolella. Muutoin asemakaavan ulkopuolella alueen maanpeite on lähiöiden, metsien ja peltojen mosaiikkia. Topografialtaan tutkimusalue on alavaa, 5–10 metriä merenpinnan yläpuolella olevaa savimaata sekä hieman korkeammalla sijaitsevia kalliopaljastumia (Suomi ym. 2012). Korkeimmat kohdat ovat 70 metriä merenpinnan yläpuolella, ja ne sijaitsevat hieman kauempana sisämaassa.

3 Aineistot ja menetelmät

3.1 Aineistot

3.1.1 TURCLIM-lämpötiladata havaintopisteistä

Tutkielmassa käytin havaintopisteiden lämpötiladataa, joka koostuu 67 HOBO U23 Pro v2 lämpötila- ja kosteusmittauslaitteen tiedoista (Turku Urban Climate Research Group 2022). Hyödynsin tietoja lämpötilahavainnoista, maankäytön luokittelusta ja topografiasta. Mittauslaitteiden tarkkuus on $\pm 0,2$ °C 0-50 °C:n lämpötilassa ja resoluutio on 0,02 °C. Alle 0 °C:n lämpötilassa tarkkuus on hieman heikompi, noin $\pm 0,38$ °C -20 °C:ssa. Loggerit on sijoitettu kolmen metrin korkeuteen säteilysuojien sisälle. Lämpötilahavainnot koostuvat päivittäin kello 00:00 (GMT + 2) alkavista mittauksista, ja havaintojen kirjausväli on 30 minuuttia. Mittauspisteitä on eniten kaupungin keskusta-alueella, mutta verkosto koostuu myös maaseutu-, esikaupunki- ja rannikkoalueiden sekä topografisesti vaihtelevien paikkojen mittauspisteistä.

Tutkimuksessa tarkastelin keskilämpötiloja kuukausitasolla kasvukauden aikana. Valitsin kuukausikohtaisen tarkastelun, koska se on tarpeeksi lyhyt huomioimaan riippumattomien vaikutusten ja muuttujien selitysvoiman vaihtelun (Suomi ym. 2012). Samalla kuukausi on ajanjaksona riittävän pitkä tasoittamaan lyhytaikaisten sääilmiöiden aiheuttamaa vaihtelua. Tutkimuksessa käytin lämpötilatietoja vuosien 2020 ja 2021 kasvukausilta, jotka ulottuivat toukokuusta syyskuuhun. Havaintoja oli 67 mittauspisteestä yhteensä lähes 15 000 kymmenen kuukauden ajalta.

3.1.2 TURCLIM-havaintopisteiden ominaisuustiedot

Tutkielmassani on hyödynnetty SLICES-maankäyttöluokitusta vesistöjen ja erityisesti meren vaikutuksen huomioon ottamiseksi. Koska vain etäisyys lähimpään vesistöön ei riitä kuvaamaan vesistöjen vaikutusta lämpötilaan Turussa, on suoritettu puskurianalyysi näiden vaikutusten arvioimiseksi (Suomi & Käyhkö 2012: 456). Kaikki vesialueisiin liittyvä maankäyttö, kuten merialueet, järvet ja joet, on yhdistetty yhdeksi luokaksi. Vesistöjen vaikutus havaintopisteissä on huomioitu muodostamalla pisteiden ympärille kahden kilometrin vyöhyke, jonka sisällä on laskettu tieto vesialueiden suhteellisesta pinta-alasta. Arvo 0 tarkoittaa, ettei vesialueita ole lainkaan, kun taas arvo 1 osoittaa, että vesialueiden osuus on 100 % kahden kilometrin säteellä olevan alueen pinta-alasta.

Suhteellisen korkeuden vaikutusta lämpötilan ajalliseen vaihteluun on analysoitu valtakunnallisen digitaalisen korkeusmallin (DEM) avulla. Mallin pikselikoko on 10 m * 10 m, ja korkeustiedon keskimääräinen tarkkuus 2 m (Korkeusmalli 25 m 2013). Jokaisen mittauspisteen suhteellinen korkeus on määritetty vertaamalla sitä ympäröivän 500 metrin vyöhykkeen keskimääräiseen korkeuteen. Tieto suhteellisesta korkeudesta ilmaisee, kuinka monta metriä ylempänä (positiivinen arvo) tai alempana (negatiivinen arvo) havaintopiste sijaitsee verrattuna ympäröivän vyöhykkeen keskimääräiseen korkeuteen.

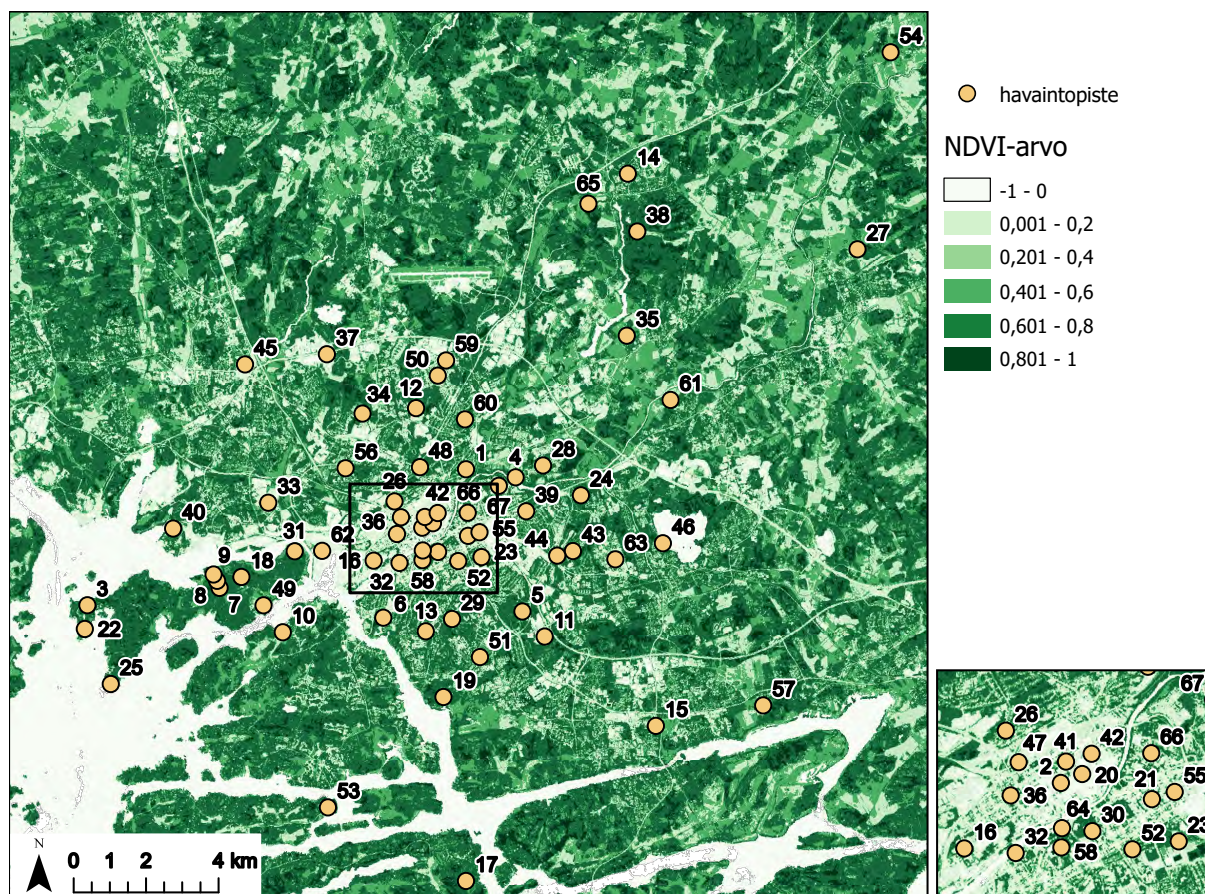
Kaupunkimaisen maankäytön vaikutusten selvittämiseksi on käytetty SLICES-maankäyttöluokitusta. Tietokanta on luotu yhdistämällä 10 maankäyttö- ja maanpeitetietokantaa, jotka ovat peräisin kuudesta eri organisaatiosta (Maa- ja metsätalousministeriö, Ympäristöministeriö, Maanmittauslaitos, Metsäntutkimuslaitos, Suomen ympäristökeskus ja Väestörekisterikeskus). Luokitus koostuu yhteensä 45 maankäyttöluokasta ja sen pikselikoko on 10 m * 10 m. Maankäyttöluokat on jaoteltu seuraaviin pääluokkiin: A = asuin- ja vapaa-ajan alueet, B = liike-, hallinto- ja teollisuusalueet, C = tukitoimintojen alueet, D = kallio- ja maa-ainesten ottoalueet, E = maatalousmaa, F = metsätalousmaa, G = muu maa ja H = vesialueet.

SLICES-luokitus soveltuu hyvin kaupunkien ilmastotutkimukseen. Se on riittävän yksityiskohtainen, ja pystyy ottamaan huomioon alueelliset erot sekä pinnan ominaisuuksissa että ihmisen aiheuttaman lämmön vapautumisen määrässä (Suomi & Käyhkö 2012). Maankäytön vaikutusta on tutkittu lämpötilamittauspisteen ympärille muodostetussa 500 metrin vyöhykkeessä. Arvo 0 tarkoittaa, että kaupunkimaista maankäyttöä ei ole lainkaan 500 metrin säteellä olevalla alueella. Arvo 1 puolestaan osoittaa, että kyseisen alueen pinta-alasta 100 % on kaupunkimaista maankäyttöä.

3.1.3 Normalisoitu kasvillisuusindeksi kasvillisuuden tilan mallintajana

Hankin tiedot normalisoidusta kasvillisuusindeksistä Euroopan unionin ja Euroopan avaruusjärjestön Sentinel-2-satelliitin datasta. Sentinel-2 koostuu sensoreista, joiden spatiaalinen erotuskyky on 10–60 metriä näkyvän, lähi-infrapun ja lyhytaaltoisen infrapun spektraalisissa kanavissa (Sentinel-2 2012). NDVI-indeksin laskemiseen käytin B4 ja B8 -kanavia, joiden resoluutio on 10 metriä. Tämä mahdollistaa kasvillisuuden tilan ja ajallisen muutoksen havaitsemisen korkean resoluution ilmakehäkuvien avulla (Al-Kindi 2023). Satelliittikuvien avulla muodostin NDVI-mosaiikin, joka käsitti tutkimusalueelta yhden

kuukauden kuvat (kuva 1). Mosaiikit koostuivat kuukausikohtaisten ajanjaksojen maksimi NDVI-arvoista.



Kuva 1. TURCLIM-havaintopisteet ja normalisoidun kasvillisuusindeksin maksimiarvot vuoden 2021 aikana (TURCLIM-havaintopisteiden sijaintitiedot; Sentinel-2)

1	Alfa	24	Kurala	46	Rauhanniemi
2	Betel	25	Kuuva	47	Rautatieasema
3	Camping	26	Kähäri	48	Rieskalähde
4	Halinen	27	Lieto	49	Ruissalo
5	Hautausmaa	28	Liponkuja	50	Runosmäki
6	Heikkilänkasarmi	29	Luolavuori	51	Ryhmäpuutarha
7	Hiiriluoto, mäki	30	Luostarivuori	52	Saarnitie
8	Hiiriluoto, manner	31	Marjaniemi	53	Satava
9	Hiiriluoto, ranta	32	Martti	54	Sikilä
10	Hirvensalo	33	Messukeskus	55	Sirkkala
11	Huhkola	34	Metsäkylä	56	Suikkila
12	Impivaara	35	Metsämäki	57	Tuorla
13	Ispoinen	36	Mikaelinkirkko	58	Urheilupuisto
14	Jäkärä	37	Mylly	59	Vahdontie
15	Kaarina	38	Niuskala	60	Valkiasvuori
16	Kakola	39	Nummi	61	Vanhalinna
17	Kakskerta	40	Pansio	62	Vapaavarasto
18	Kasvitieteellinen	41	Puolalanmäki	63	Varissuo
19	Katariina	42	Puutori	64	Virastotalo
20	Kauppatori	43	Pääskyvuori	65	Ylijoki
21	Kerttuli	44	Pääskyvuori_ws_logger	66	Yliopistonmäki
22	Kolkka	45	Raisio	67	Yo-kylä
23	Kupittaa				

Satelliittikuvien avulla kehitetty NDVI-mosaiikki jokaiselta kuukaudelta vietiin ArcGIS Pro -ohjelmistoon sen visualisoinnin mahdollistamiseksi ja NDVI-indeksin arvojen tarkastelemiseksi. Tutkimuksessa hyödynsin satelliittikuvia, joissa pilvien peittävyys oli alle 20 %. Vuonna 2020 pikselikohtaisesta tarkastelusta puuttui viisi NDVI-indeksihavaintoa. Vuonna 2021 puuttuvia havaintoja oli yhteensä 17, joista suurin osa oli syyskuulta. Puuttuvat arvot olivat seurausta siitä, että pilvisyystilanne tai muut tekijät estivät NDVI-indeksin arvojen selvittämisen jokaiselle pikselille. Näissä tilanteissa tarkastelin maanpeitteen samankaltaisuutta mittauspisteen viereisissä pikseleissä, ja valitsin lähimpänä mittauspistettä olevan pikselin arvon.

3.2 Analyysimenetelmät

3.2.1 Korrelaatiokertoimet

Kasvillisuuden ja keskilämpötilan välisen korrelaation selvittämiseksi selvitin normalisoidun kasvillisuusindeksin arvot satelliittikuvien avulla. Lisäksi laskin kuukausikohtaiset keskilämpötilat 67 mittauspisteestä. Selvitin kuukausikohtaiset keskilämpötilat MS Excel -ohjelmalla käyttäen puolen tunnin välein mitattuja havaintoja jokaisesta mittauspisteestä toukokuun ja syyskuun väliseltä ajanjaksolta. Korrelaatioanalyysissä käytin kasvillisuuden ja lämpötilojen yhteyden selvittämiseksi lämpötilamuuttujana kuukausikohtaista keskilämpötilaa.

Normalisoidun kasvillisuusindeksin arvojen selvittämiseksi tein ohjelmakoodin, jota käytin Google Earth Engine -alustalla satelliittikuvadatan käsittelyyn ja analysointiin. Aluksi määrittelin havaintopisteet sisältävän tutkimusalueen, ja hankin käyttöön Sentinel-2-satelliittikuvadatan jokaisen kasvukauden kuukauden ajalta. Poistin satelliittikuvista pilviset pikselit, ja loin tutkimusalueelle rajatun pilvettömän kuvamosaiikin. Sen jälkeen siirryin normalisoidun kasvillisuusindeksin arviointiin ja visualisointiin, kun laskin NDVI-indeksin kaavan $(NIR - RED) / (NIR + RED)$ avulla. Lopuksi selvitin NDVI-indeksin sekä mittauspisteen pikselissä (10 m x 10 m) että pisteen ympärille muodostetussa 100 metrin vyöhykkeessä. Laskin vyöhykekohtaisen NDVI-indeksin keskiarvona vyöhykkeen sisällä sijaitsevien pikseleiden NDVI-indeksin arvoista.

Kasvillisuuden ja keskilämpötilojen välisen korrelaation arvioimiseksi käytin Pearsonin ja Spearmanin korrelaatiokertoimia. Laskin korrelaatiokertoimien arvot normalisoidun kasvillisuusindeksin ja keskilämpötilan välillä jokaisena tutkimuskuukautena. NDVI-indeksin

arvot selvitin joko mittauspisteen yksittäisestä pikselistä tai mittauspisteen ympärille muodostetusta 100 metrin vyöhykkeestä. Tämä kaksitasoinen kasvillisuuden tarkastelu mahdollistaa kokonaisvaltaisemman lähestymistavan, joka kattaa sekä pistekohtaiset että alueelliset ominaisuudet.

Kummankin kasvukauden ajalta valitsin yhden seitsemän päivän hellejakson, jonka aikana lämpötilat olivat keskimääräistä korkeampia. Vuoden 2020 hellejakso oli välillä 21.-27.6.2020 ja vuoden 2021 hellejakso 9.-15.7.2021. Korrelaatioanalyysissä hyödynsin keskilämpötilaa toisena suurena. Toisena suurena käytin joko havaintopisteiden pikseli- tai vyöhykekohtaisia normalisoidun kasvillisuusindeksin arvoja. Valitsin hellejakson keskilämpötilan toiseksi muuttujaksi, sillä tein myös muut vertailut käyttäen keskilämpötilaa toisena muuttujana. Tämä mahdollisti yhteismitallisen vertailun tulosten välillä. Lisäksi keskilämpötila kuvaa lämpöolosuhteita kokonaisvaltaisemmin kuin vuorokauden minimilämpötila tai aamuyön lämpötila. Tämä on merkityksellistä, kun arvioidaan kasvillisuuden potentiaalia tai lämpösaarekeilmiön hillitsemistä.

3.2.2 Lineaarinen regressiomalli

Käytin lineaarista regressiomallia kahden tai useamman muuttujan välisen suhteen tutkimiseen. Sen avulla pyrin löytämään lineaarisen suhteen selitettävän muuttujan ja useamman selittävän muuttujan välillä (Taanila 2020). Analyysin suorittamiseksi on hyvä ottaa huomioon kaikki olennaisesti tarkasteltavaan muuttujaan vaikuttavat selittävät muuttujat. Siksi tässä tutkielmassa selvitin kasvillisuuden, vesialueiden, topografian ja kaupunkimaisen maankäytön vaikutusta keskilämpötilaan.

Lineaarisen regressiomallin selitettäväksi muuttujaksi valitsin keskilämpötilan, ja selittäviksi muuttujiksi kuukausikohtaisen normalisoidun kasvillisuusindeksin, vesialueet, suhteellisen korkeuden ja kaupunkimaisen maankäytön. Mallissa hyödynnettiin havaintopisteiden pikselikohtaisia NDVI-indeksin arvoja. Lähtökohtaisesti otin mukaan malliin myös kaupunkimaisen maankäytön, jonka käyttöä harkitsin sen VIF-kertoimen perusteella. Kaupunkimainen maankäyttö on ikään kuin käännteinen muuttuja NDVI-indeksille, jolloin molemmat muuttujat regressiomallissa voivat aiheuttaa multikollineaarisuusongelman. Tällöin muuttujat selittävät osittain saman osan selitettävän muuttujan käyttäytymisestä (Mellin 2006). Valitsin selittävät muuttujat Enter-asetuksella regressiomalliin. Tällöin mukana oli myös muuttujia, jotka eivät olleet tilastollisesti merkitseviä.

Analyysin tuloksena sain sekä regressiokertoimet että beta-kertoimet kuvaamaan selittävien muuttujien painoarvoa (Taanila 2020). Jos selittävien muuttujien arvot ovat eri suuruusluokkaa, regressiokertoimien avulla on haastavaa arvioida niiden merkitystä. Beta-kertoimia vertailemalla voidaan kuitenkin selvittää, mikä on kunkin muuttujan suhteellinen vaikutus regressiomallissa. Beta-kertoimien positiivinen etumerkki viittaa siihen, että selittävän muuttujan kasvaessa myös selitettävän muuttujan arvo kasvaa. Päinvastoin negatiivinen etumerkki osoittaa, että selittävän muuttujan kasvaessa selitettävän muuttujan arvo pienenee.

4 Tulokset

4.1 Pikselikohtainen lämpötilan ja kasvillisuuden välinen korrelaatio

Korrelaatioanalyysi normalisoidun kasvillisuusindeksin ja keskilämpötilan välillä osoittaa, että muuttujien välillä on yhteys koko kasvukauden ajan. Pikselikohtainen (10 m x 10 m) kasvillisuuden ja keskilämpötilan välinen korrelaatio on voimakkain kesäkuusta elokuuhun (taulukko 1). Sen sijaan toukokuussa ja syyskuussa havaitaan heikoin korrelaatio muuttujien välillä. Keskilämpötilan ja NDVI-indeksin välillä on melko voimakas negatiivinen korrelaatio koko kasvukauden ajan. Spearmanin ja Pearsonin korrelaatiokertoimet noudattavat samankaltaista linjaa eli kertoimien arvot ovat lähellä toisiaan koko kasvukauden ajan. Sekä Pearsonin että Spearmanin korrelaatiokertoimien p-arvot ovat pienempiä kuin 0,05, mikä osoittaa, että korrelaatiokertoimet ovat tilastollisesti merkitseviä.

Taulukko 1. Keskilämpötilan ja NDVI-indeksin välinen korrelaatio kasvukauden aikana vuonna 2020

Kuukausi	toukokuu	kesäkuu	heinäkuu	elokuu	syyskuu
Spearman	-0,475	-0,619	-0,533	-0,518	-0,429
Pearson	-0,495	-0,594	-0,498	-0,523	-0,376

Kuten vuonna 2020, myös vuonna 2021 kasvillisuuden ja keskilämpötilan välinen korrelaatio lämpötilojen havaintopisteissä on voimakkaimmillaan kesäkuussa ja heikoimmillaan syyskuussa (taulukko 2). Itseisarvoltaan suurin korrelaatio havaitaan kesäkuussa, jolloin kasvillisuuden viilentävä vaikutus on voimakkaimmillaan. Tällöin Pearsonin korrelaatiokertoimen arvo on -0,657. Sekä Spearmanin että Pearsonin korrelaatiokertoimet osoittavat melko voimakkaan negatiivisen korrelaation kasvukauden aikana. Kaikki korrelaatiokertoimet ovat tilastollisesti merkitseviä ($p < 0,05$). Muuttujien välinen korrelaatio on hieman voimakkaampi jokaisena kasvukauden kuukautena vuonna 2021 verrattuna vuoden 2020 kasvukauteen.

Taulukko 2. Keskilämpötilan ja NDVI-indeksin välinen korrelaatio kasvukauden aikana vuonna 2021

Kuukausi	toukokuu	kesäkuu	heinäkuu	elokuu	syyskuu
Spearman	-0,591	-0,657	-0,572	-0,506	-0,479
Pearson	-0,581	-0,649	-0,577	-0,488	-0,455

4.2 Vyöhykekohtainen keskilämpötilan ja kasvillisuuden välinen korrelaatio

Vuoden 2020 kesäkuussa keskilämpötilan ja normalisoidun kasvillisuusindeksin välinen korrelaatio on voimakkain, kun taas syyskuussa se on heikoin (taulukko 3). Muuttujien välinen yhteys ilmenee havaintopisteiden keskilämpötilan ja NDVI-indeksin välillä, kun havaintopisteen ympärille muodostettiin 100 metrin vyöhyke NDVI-indeksin keskiarvon selvittämiseksi. Muuttujien välillä on erityisesti kasvukauden keskellä voimakas negatiivinen korrelaatio, joka heikkenee hieman kasvukauden alkua ja loppua kohden. Spearmanin ja Pearsonin korrelaatiokertoimet noudattavat samankaltaista trendiä koko kasvukauden ajan. Sekä Spearmanin että Pearsonin korrelaatiokertoimet ovat tilastollisesti merkitseviä merkitsevyystasolla 0,05.

Taulukko 3. Keskilämpötilan ja NDVI-indeksin välinen korrelaatio kasvukauden aikana vuonna 2020

Kuukausi	toukokuu	kesäkuu	heinäkuu	elokuu	syyskuu
Spearman	-0,629	-0,809	-0,802	-0,741	-0,637
Pearson	-0,598	-0,815	-0,802	-0,748	-0,584

Vuonna 2021 mittauspisteillä kasvillisuuden ja lämpötilojen välinen korrelaatio on voimakkain kesä-heinäkuussa, kun taas heikoin se on toukokuussa ja syyskuussa (taulukko 4). Itseisarvoltaan suurin korrelaatio havaitaan kesäkuussa, jolloin muuttujien välinen yhteys on voimakkain, ja kasvillisuuden viilentävä vaikutus on voimakkaimmillaan. Tällöin Pearsonin korrelaatiokerroin on -0,789. Sekä Spearmanin että Pearsonin korrelaatiokertoimet kesä-heinäkuussa osoittavat muuttujien välisen voimakkaan negatiivisen korrelaation. Muiden kasvukauden kuukausien aikana korrelaatio on hieman heikompi.

Taulukko 4. Keskilämpötilan ja NDVI-indeksin välinen korrelaatio kasvukauden aikana vuonna 2021

Kuukausi	toukokuu	kesäkuu	heinäkuu	elokuu	syyskuu
Spearman	-0,679	-0,791	-0,759	-0,685	-0,676
Pearson	-0,645	-0,789	-0,781	-0,643	-0,625

Korrelaatiokertoimia tarkasteltaessa voidaan havaita, että trendit ovat samankaltaiset molempina vuosina sekä pikselikohtaisessa että vyöhykkeisessä tarkastelussa. Muuttujien välinen korrelaatio on kasvukauden keskellä kesä-elokuussa voimakkaampi vuonna 2020 kuin vuonna 2021. Toukokuussa ja syyskuussa korrelaatio on voimakkaampi vuonna 2021

verrattuna kyseisiin kuukausiin vuonna 2020. Negatiiviset korrelaatiokertoimet osoittavat, että keskilämpötilan ja kasvillisuuden suhde on käänteinen: korkeammat lämpötilat ovat yhteydessä matalampaan kasvillisuuden tiheyteen tai päinvastoin. Vaikka korrelaatiokertoimien absoluuttiset arvot vaihtelevat vuosien ja kuukausien välillä, yleinen trendi on se, että korrelaatio on voimakkaimmillaan kasvukauden keskellä kesä-heinäkuussa.

4.3 Kasvillisuuden vaikutus hellejaksojen keskilämpötilaan

Hellejaksojen aikana keskilämpötilat olivat korkeampia kuin kuukausikohtaiset keskilämpötilat. Korrelaatiokertoimet osoittavat hellejaksojen keskilämpötilan ja normalisoidun kasvillisuusindeksin välisen yhteyden vuosien 2020 ja 2021 kasvukausien aikana (taulukko 5). Hellejakson keskilämpötilan ja NDVI-indeksin välinen korrelaatio on negatiivinen molempien hellejaksojen aikana. Pikselikohtainen NDVI-indeksi ja hellejakson keskilämpötila korreloivat melko voimakkaasti molempina vuosina. Vyöhykekohtaisen NDVI-indeksin ja hellejakson keskilämpötilan välillä on voimakas negatiivinen korrelaatio. Vyöhykekohtaisessa tarkastelussa korrelaatio on voimakkaampi kuin pikselikohtaisessa tarkastelussa. Kaikki korrelaatiokertoimet ovat tilastollisesti merkitseviä, sillä p-arvot ovat alle 0,05.

Taulukko 5. Hellejakson keskilämpötilan ja NDVI-indeksin välinen korrelaatio vuoden 2020 kesäkuussa ja 2021 heinäkuussa

	pikselikohtainen korrelaatio 2020	vyöhykekohtainen korrelaatio 2020	pikselikohtainen korrelaatio 2021	vyöhykekohtainen korrelaatio 2021
Spearman	-0,564	-0,772	-0,571	-0,779
Pearson	-0,578	-0,766	-0,603	-0,790

Hellejaksojen ajalta tehdyssä tarkastelussa korrelaatiokertoimet vastaavat keskimäärin kuukausikohtaisten tulosten korkeimpia arvoja. Hellejaksojen aikana keskilämpötilan ja kasvillisuuden välinen korrelaatio on samalla tasolla kuin kesäkuussa, jolloin se on voimakkaimmillaan. Vyöhykekohtainen keskilämpötilan ja NDVI-indeksin välinen korrelaatio on hellejaksojen aikana voimakkaampi verrattuna pikselikohtaiseen tarkasteluun. Negatiiviset korrelaatiokertoimet osoittavat, että korkeammat NDVI-indeksin arvot viittaavat matalampaan keskilämpötilaan erityisesti silloin, kun lämpötila on keskimääräistä korkeampi. Tämä osoittaa kasvipeitteen merkittävän viilentävän vaikutuksen hellejaksojen aikana.

4.4 Ominaisuustekijöiden vaikutus keskilämpötilaan

Vuoden 2020 kasvukauden osalta tehty regressioanalyysi osoittaa, että erityisesti normalisoidulla kasvillisuusindeksillä, vesialueilla ja kaupunkimaisella maankäytöllä on vaikutusta kuukausikohtaisiin keskilämpötiloihin (taulukko 6). Kuukausikohtaiset regressiomallit ovat tilastollisesti merkitseviä merkitsevyystasolla 0,05 jokaisena kasvukauden kuukautena. Regressiomallin selitysaste on kasvukauden ajan välillä 0,27–0,41. Suurimmat selitysasteen arvot havaitaan kesäkuussa ja pienimmät toukokuussa sekä syyskuussa. Regressiomallista saatujen beta-kertoimien avulla voidaan vertailla kunkin ominaisuustekijän vaikutusta keskilämpötilaan. Ominaisuustekijöistä NDVI-indeksin ja kaupunkimaisen maankäytön beta-kertoimet ovat tilastollisesti merkitseviä ($p < 0,05$) jokaisena kuukautena. Vesialueiden beta-kertoimet ovat tilastollisesti merkitseviä heinä-syyskuussa mutta eivät touko-kesäkuussa. Beta-kertoimet eivät ole tilastollisesti merkitseviä yhdenkään kasvukauden kuukauden aikana, kun tutkitaan suhteellisen korkeuden vaikutusta keskilämpötilaan.

Taulukko 6. Ominaisuustekijöiden vaikutus keskilämpötilaan kasvukauden aikana vuonna 2020.

Kuukausi	toukokuu	kesäkuu	heinäkuu	elokuu	syyskuu
R ²	0,27	0,42	0,35	0,35	0,29
NDVI	-0,36	-0,48	-0,39	-0,37	-0,34
Vesialueet	0,23*	0,12*	0,34	0,33	0,41
Suhteellinen korkeus	0,05*	-0,007*	-0,06*	-0,01*	0,02*
Kaupunkimainen maankäyttö	0,34	0,34	0,37	0,39	0,34

* ei ole tilastollisesti merkitsevä, koska p-arvo on yli 0,05

Kasvillisuutta mallintavalla NDVI-indeksillä on negatiivinen beta-kerroin keskilämpötilaan jokaisena kasvukauden kuukautena. Voidaan sanoa, että suurempi kasvillisuuden tiheys vaikuttaa viilentävästi keskilämpötiloihin. Vesialueiden vaikutus keskilämpötilaan on positiivinen. Vaikutus vahvistuu kasvukauden edetessä sen ollessa syyskuussa voimakkaimmillaan, jolloin beta-kerroin on 0,41. Kaupunkimaisella maankäytöllä on positiivinen vaikutus keskilämpötilaan ja se pysyttelee samalla tasolla koko kasvukauden, kun beta-kerroin on 0,34–0,39.

Kasvukauden jokaiselle kuukaudelle suoritettavat regressiomallit ovat tilastollisesti merkitseviä merkitsevyystasolla 0,05 vuonna 2021. Regressiomallien selityasteet vaihtelevat välillä 0,33–0,44 ollen suurimmillaan kesäkuussa ja pienimmillään syyskuussa. Vuoden 2021 kasvukauden aikana NDVI-indeksillä on viilentävä vaikutus keskilämpötilaan jokaisena kuukautena (taulukko 7). Kasvukauden ensimmäisinä kuukausina viilentävä vaikutus lämpötilaan on voimakkaampi kuin loppukesän aikana. Jokaiselle kasvukauden kuukaudelle saadut beta-kertoimet ovat tilastollisesti merkitseviä NDVI-indeksin osalta. Vesialueiden havaitaan vaikuttavan lämpötilaan positiivisesti koko kasvukauden ajan. Vaikutus kasvaa kasvukauden edetessä ja on voimakkaimmillaan elo-syyskuussa. Heinä-syyskuussa vesialueiden vaikutusta kuvaavat beta-kertoimet ovat tilastollisesti merkitseviä, kun taas touko-kesäkuussa kertoimet eivät ole tilastollisesti merkitseviä.

Taulukko 7. Ominaisuustekijöiden vaikutus keskilämpötilaan kasvukauden aikana vuonna 2021.

Kuukausi	toukokuu	kesäkuu	heinäkuu	elokuu	syyskuu
R ²	0,34	0,44	0,40	0,35	0,33
NDVI	-0,49	-0,55	-0,45	-0,41	-0,35
Vesialueet	0,07*	0,12*	0,28	0,38	0,38
Suhteellinen korkeus	-0,009*	-0,01*	0,03*	-0,08*	-0,03*
Kaupunkimainen maankäyttö	0,22*	0,27	0,38	0,35	0,40

* ei ole tilastollisesti merkitsevä, koska p-arvo on yli 0,05

Suhteellisen korkeuden vaikutus keskilämpötilaan on vähäinen koko kasvukauden ajan. Analyysin tuloksena saadut beta-kertoimet eivät ole suhteellisen korkeuden osalta tilastollisesti merkitseviä yhdenkään kasvukauden kuukauden aikana. Kaupunkimaisen maankäytön vaikutusta kuvaavat beta-kertoimet ovat tilastollisesti merkitseviä jokaisena kasvukauden kuukautena paitsi toukokuussa. Kaupunkimaisen maankäytön vaikutus keskilämpötilaan on lämmittävä koko kasvukauden ajan. Sen vaikutus korostuu kasvukauden loppua kohti ollen voimakkaimmillaan syyskuussa.

Kun vertaillaan vuosien 2020 ja 2021 kasvukauden eri kuukausien korrelaatiokertoimia, havaitaan sekä samankaltaisuuksia että pieniä eroavaisuuksia. Ensinnäkin kummankin vuoden aikana normalisoidun kasvillisuusindeksin vaikutus keskilämpötilaan on negatiivinen kaikkina

kuukausina. Siten kasvillisuus vaikuttaa viilentävästi keskilämpötilaan sekä vuonna 2020 että 2021. Toiseksi vesialueiden vaikutus on lämmittävä suhteessa keskilämpötilaan molempina vuosina, mutta sen vaikutuksen voimakkuus vaihtelee huomattavasti. Molempina vuosina on havaittavissa vesialueiden vaikutuksen voimakkuuden kasvamista kasvukauden edetessä. Kolmanneksi kaupunkimaisen maankäytön vaikutus keskilämpötilaan on lämmittävä molempina vuosina, ja sen voimakkuus pysyy suhteellisen tasaisena koko kasvukauden ajan.

5 Keskustelu

5.1 Kasvillisuuden vaikutus lämpötilaan kasvukauden aikana

Tässä tutkimuksessa on tarkasteltu kasvipeitteen vaikutusta lämpötilaan Turun alueella vuosina 2020 ja 2021. Kasvipeitteen vaikutusta on tutkittu aiemmin normalisoidun kasvillisuusindeksin avulla erityisesti Aasiassa, Kiinan ja Mongolian ylänköalueilla, mutta Suomen ilmasto-olosuhteissa tutkimusta on tehty melko vähän. Lisäksi useimmat tutkimukset ovat keskittyneet NDVI-indeksin arvojen vaihteluiden tutkimiseen aikasarjojen aikana matalien ja keskileveyksien alueilla. Turussa kasvipeitteen vaikutusta lämpötilaan on tutkittu NDVI-indeksiä muistuttavan 'greenness'-indeksin avulla (Suomi ym. 2012). Molemmat indeksit mahdollistavat kasvillisuuden tilan seuraamisen sekä kasvillisuuden lämpövaikutuksen arvioinnin.

Tutkimuksessa käytetty TURCLIM-lämpötila-aineisto sisälsi yhteensä vajaa 15000 havaintoa vuosien 2020 ja 2021 kasvukausien ajalta, ja puuttuvia arvoja aineistossa oli alle kymmenen. Siten lämpötila-aineistosta laskettuja arvoja voidaan pitää luotettavina. Yleisesti korkeimmat keskilämpötilat havaittiin kaupungin keskustassa, ja matalimmat lämpötilat kaupungin keskustan ulkopuolella lämpösaarekeilmiön mukaisesti. 2000-luvun aikana kaupunkikehitys johtaa kaupunki-ilmaston lämpenemiseen (Krayenhoff ym. 2021). Krayenhoffin ym. (2021) mukaan erityisesti lämpiminä vuodenaikoina tämä aiheuttaa terveyshaittoja ja lisää energiankulutusta. Vihreän infrastruktuurin avulla voidaan alentaa lämpötilaa tehokkaasti, sillä sen lämmönvarauskapasiteetti on alhainen. Se kykenee heijastamaan auringon säteilyä pois kaupunkiympäristöstä ja muuntamaan absorboitunutta aurinkoenergiaa tuntuvasta lämmöstä latentiksi lämmöksi. Tämä on tärkeää tunnistaa myös Turussa, jossa kaupungin ilmastoa viilentävien tekijöiden merkitys korostuu etenkin hellejaksojen aikana.

Kasvillisuuden kasvua ohjaavat pääasiassa hydrotermiset olosuhteet. Kasvillisuuden kasvu on voimakkaasti yhteydessä lämpötilaan, sademäärään, maaperään ja saatavilla oleviin ravinteisiin (Pei ym. 2019). Lämpötilan ja kasvillisuuden välinen suhde seuraa tiettyjä kausittaisia malleja, ja vuodenaajalla on vaikutusta tähän suhteeseen. Tämä havainto tarjoaa arvokasta tietoa siitä, miten kasvillisuus reagoi ilmastonmuutokseen ja muuttuviin ympäristöolosuhteisiin. Turussa lämmön ja kosteuden lisääntyminen kasvukauden edetessä mahdollistaa kasvillisuuden määrän ja tiheyden kasvun, mikä ilmenee suurempina NDVI-indeksin arvoina. Kasvillisuuden ja

samalla NDVI-indeksin kasvu voi parantaa paikallista ekosysteemin vakautta, mikä saattaa vähentää esimerkiksi maaperän eroosiota (Arsenault ym. 2005; Hao ym. 2008).

Tutkielmassa saatujen tulosten perusteella NDVI-indeksin arvot kasvavat kasvukauden edetessä ollen suurimmillaan kesä-elokuussa. Tämän jälkeen arvot pienenevät suurimmassa osassa havaintopisteitä lehtien ja muun kasvillisuuden kellastumisen seurauksena viimeistään syyskuun aikana. Nämä havainnot ovat linjassa aiempien tutkimusten kanssa, joissa yleinen suunta NDVI-indeksille on ollut nouseva kasvukauden alkupuolella (Piao ym. 2003). Korrelaatioanalyysin tulokset vahvistivat voimakkaan suhteen NDVI-indeksin ja lämpötilan välillä jokaisena kasvukauden kuukautena. Heinäkuuhun asti kasvavat keskilämpötilat ja NDVI-indeksin arvot korreloivat keskenään voimakkaasti. Suurin korrelaatio havaitaan kesäkuussa (-0,815). Negatiiviset korrelaatiokertoimet kertovat kasvillisuuden keskilämpötilaa viilentävästä vaikutuksesta, mikä on havaittu myös aiemmissä tutkimuksissa (Krayenhoff ym. 2021).

Tässä tutkielmassa hellejaksojen aikana havaitut korrelaatiokertoimet keskilämpötilan ja normalisoidun kasvillisuusindeksin välillä vastasivat suurelta osin kuukausikohtaisten tarkastelujen maksimikertoimia. Sekä pikselikohtaisen että vyöhykekohtaisen tarkastelun tulokset vahvistavat hellejakson keskilämpötilan ja NDVI-indeksin välisen negatiivisen korrelaation. Korrelaatio oli hellejaksojen aikana keskimääräistä voimakkaampi verrattuna kuukausikohtaiseen tarkasteluun. Kasvillisuuden merkitys korostuu lämpösaarekkeen intensiteetin minimoimisessa, kuten aiemmissä tutkimuksissa on todettu (Zhou ym. 2016; Lima Alves & Lopes 2017). Lima Alvesin ja Lopesin (2017) mukaan korkeampi NDVI-indeksi heikentää lämpösaarekettä erityisesti silloin, kun lämpötilat ovat korkeita. Nämä huomiot korostavat kasvillisuuden merkitystä kaupunkiympäristössä hellejaksojen aikana.

Tutkielmassa saadut lineaarisen regressiomallin tulokset osoittavat, että kuukausikohtaiset keskilämpötilat voidaan selittää Turun alueella parhaiten normalisoidun kasvillisuusindeksin, vesialueiden ja maankäytön avulla. Mallin selitysvoima on heikoin suhteellisen korkeuden osalta. Beta-kertoimien mukaan vuosien 2020 ja 2021 kasvukausien aikana normalisoitu kasvillisuusindeksi ja maankäyttö ovat merkittävimmät tekijät, jotka aiheuttavat vaihtelua keskilämpötiloissa havaintoalueella. Vesialueiden merkitys korostuu kasvukauden edetessä elo-syyskuun aikana. Kasvillisuuden vaikutus on kumpanakin vuonna voimakkaimmillaan kesäkuussa, mutta se pysyttelee melko samalla tasolla koko kasvukauden ajan. Kasvipeitettä

kuvaavat beta-kertoimet ovat koko kasvukauden ajan negatiivisia. Siten kasvillisuudella on viilentävä vaikutus havaintopisteiden kuukausikohtaisiin keskilämpötiloihin. Kasvillisuudella ja viherrakentamisella on merkitystä ympäristöön erityisesti paikallisella tasolla (Krayenhoff ym. 2021). Myös muilla muuttujilla on huomattava rooli lämpötilavaihteluissa, mikä pitää ottaa huomioon kasvillisuuden viilentävän vaikutuksen voimakkuutta arvioitaessa.

Kaksitasoinen lähestymistapa mahdollistaa kokonaisvaltaisen ymmärryksen kasvillisuuden vaikutuksesta lämpötilaan Turun alueella. Tarkastelua on tehty selvittämällä yksittäisten havaintopisteiden NDVI-indeksin arvoja, jotka kuvaavat kasvillisuuden tiheyttä itse havaintopisteessä. Toisella tasolla tarkastelua on laajennettu 100 metrin säteellä havaintopistettä ympäröivään vyöhykkeeseen, jonka sisältä on laskettu NDVI-indeksin keskiarvo. Vyöhykekohtainen korrelaatio muuttujien välillä on pistekohtaista voimakkaampi. Tämä voi olla seurausta siitä, että vyöhyke ottaa huomioon havaintopisteen ympäristön kattavammin kuin pikselikohtainen tarkastelu. Siten kasvillisuuden ja keskilämpötilan suhdetta on hyödyllisempää kuvata vyöhyketarkastelun avulla. Yksittäinen pikseli voi sisältää huomattavasti enemmän tai vähemmän kasvillisuutta kuin pisteen ympäristö, mikä voi vaikuttaa pikselikohtaisen NDVI-indeksin ja keskilämpötilan välisiin korrelaatiokertoimiin. Siten vyöhykkeinen korrelaatiotarkastelu tarjoaa luotettavampia tuloksia siitä, millainen pisteen lähiympäristö on ja miten sen kasvillisuus vaikuttaa keskilämpötilaan.

Sekä pikselikohtaisen että vyöhykkeisen tarkastelun käyttö mahdollistaa luotettavamman analyysin kasvillisuuden tilan vaihtelusta, ja siten myös kasvillisuuden ja keskilämpötilojen suhteesta. Tämä suhde on negatiivinen koko tarkastelujakson ajan. NDVI-indeksin ja ilmaston välisen suhteen tutkiminen edellyttää alueen ilmastotyypin analysoimista, jotta saadaan selvitettyä esimerkiksi sadannan ja lämpötilan merkitys tutkitulla ajanjaksolla (Pei ym. 2019). Näin ollen yhdistämällä kaksitasoinen lähestymistapa ja tutkitut ilmastotekijät voidaan saada kokonaisvaltainen kuva siitä, miten kasvillisuus ja muut tekijät vaikuttavat keskilämpötilaan Turussa.

Ilmastomuutoksen odotetaan vaikuttavan monin tavoin ihmisten terveyteen, mikä on seurausta lämpötilojen ja sademäärien muutosten suorista ja epäsuorista vaikutuksista (Bowler ym. 2010). Erityisesti trooppisilla alueilla kuumat ja kuivat yöt voivat johtaa epämiellyttäviin tilanteisiin, ja jopa kasvavaan kuolleisuuteen etenkin haavoittuvimmissa väestöryhmissä (Lima Alves & Lopes 2017). Yleisesti lämpötilan ja sademäärän nousu johtaa normalisoidun

kasvillisuusindeksin kasvuun useimmilla alueilla, mutta korkeat lämpötilat voivat aiheuttaa myös kausittaista kuivuutta kuivemmilla alueilla (Piao ym. 2003). Tässä tutkielmassa havaittiin, että hellejaksojen aikana kasvillisuus ja keskilämpötila korreloivat voimakkaasti. Hellejaksojen aikana havaittu voimakas korrelaatio korostaa kasvillisuuden viilentävää vaikutusta suhteessa lämpötilaan. Tämä osoittaa kasvillisuuden merkityksen lämpötilan nousun hillitsemisessä kaupunkialueilla.

Saadut tutkimustulokset antavat käsityksen siitä, miten kasvillisuus vaikuttaa lämpötiloihin. Tämä vaikutus heijastuu myös ihmisten hyvinvointiin kaupunkiympäristössä, erityisesti ilmastonmuutosten vaikutusten kasvaessa. Kasvillisuuden ja lämpötilan välisen korrelaation voimakkuus korostaa tarvetta säilyttää ja lisätä kasvillisuutta kaupunkialueilla. Tulevaisuudessa onkin tärkeää jatkaa kasvillisuuden ja lämpötilan välisten suhteiden tutkimista eri alueilla ja ilmasto-olosuhteissa.

5.2 Vesialueiden, topografian ja maankäytön vaikutus lämpötilaan

Rannikon läheisyydessä sijaitsevien havaintopisteiden keskilämpötilat olivat keskimäärin korkeampia kuin niiden, jotka sijaitsivat kauempana vesistöistä. Tämä ero oli huomattava loppukesän ja alkusyksyn aikana. Alkukesällä sekä vesistöjen läheisyydessä että mannermaisessa ympäristössä keskilämpötilat olivat melko samansuuruisia. Beta-kertoimien perusteella vesialueiden vaikutus keskilämpötilaan voimistuu kasvukauden aikana. Vesialueiden vaikutus on voimakkaimmillaan syyskuussa kumpanakin vuonna. On havaittu, että keväällä vesistöjen vaikutus on vähäinen keskilämpötilaan (Väyrynen ym. 2017). Tämä havaitaan myös tässä tutkielmassa, kun toukokuun beta-kertoimet ovat lähellä nollaa. Beta-kertoimet ovat koko kasvukauden ajan positiivisia eli vesialueiden vaikutus keskilämpötilaan lämmittävä. Beta-kertoimien nouseva trendi kasvukauden aikana kertoo vesialueiden lämmittävän vaikutuksen voimistumisesta kohti syksyä.

Vesialueilla on selkeämpi kausittainen luonne kuin muilla tarkastelluilla tekijöillä. Loppukesän aikana vesialueiden vaikutus nousee beta-kertoimien perusteella samalle tasolle kuin normalisoidun kasvillisuusindeksin ja kaupunkimaisen maankäytön. Syksyllä meren vaikutus korostuu rannikkoalueilla sen lämmittävän vaikutuksen vuoksi (Suomi 2014). Suomen (2014) mukaan vesialueiden lämmittävä vaikutus on Turun alueella suurimmillaan syksyllä ollen voimakkaimmillaan loka-marraskuussa. Tutkimustietoon perustuen lämmittävä vaikutus jatkuu Suomen etelärannikolla yleensä loppukesästä talveen asti (Väyrynen ym. 2017). Väyrysen ym.

(2017) mukaan kesän ja alkusyksyn aikana mereen varastoitunut lämpöenergia jatkaa rannikkoalueiden lämmittämistä. Samalla auringon lämpösäteilyn vaikutus vähenee, ja lämpötilat alkavat laskea kohti talvea.

Suurten vesistöjen läheisyys voi nostaa alueen minimilämpötiloja ja alentaa maksimilämpötiloja, mikä johtuu vesistöjen suuresta lämpökapasiteetista (Väyrynen ym. 2017). Väyrysen ym. (2017) mukaan vaikutus on huomattava Turussa, jossa Itämeren läheisyys korostaa lämpötilojen vaihtelua eri vuodenaikoina eri osissa tutkimusaluetta. Vesistöjen vaikutus lämpötilaan on huomattava loppukesästä talveen asti, kun vesistöjen lämpeneminen tai jääpeitteen muodostuminen muuttaa alueen ilmastoa. Esimerkiksi Turussa meren lämmittävä vaikutus korostuu syksyn edetessä, mikä johtaa lämpimien alueiden siirtymiseen lähelle rannikkoa. Ilmiö havaittiin myös tässä tutkielmassa, jossa regressiomallin tulosten perusteella vesialueiden lämmittävä vaikutus kasvoi kasvukauden edetessä.

Tutkielmassa saadut regressiomallin tulokset osoittavat, että suhteellisen korkeuden vaikutus keskilämpötilaan on selitysvoimaltaan heikoin kasvukauden aikana verrattuna muihin tutkittuihin muuttujiin. Lisäksi suhteellisen korkeuden vaikutuksen voimakkuutta kuvaavat beta-kertoimet eivät olleet tilastollisesti merkitseviä kasvukauden aikana. Samankaltaisia tuloksia on saatu myös aiemmissa tutkimuksissa, joissa lineaarisen regressiomallin avulla on tarkasteltu suhteellisen korkeuden vaikutusta keskilämpötilaan (Suomi & Käyhkö 2012). Näissä tutkimuksissa tilastollisesti merkitseviä beta-kertoimia on esiintynyt ainoastaan maaliskuun ja huhtikuun osalta.

Kaupunkialueiden topografia vaikuttaa lämpösaarekkeen muodostumiseen. Topografian vaikutus keskilämpötilaan voi korostua inversiotilanteissa, joissa lämpötilaerot voivat olla huomattavia, vaikka korkeuserot olisivat pieniä (Goldreich 1984). Turussa tehtyjen tutkimusten mukaan topografialla on vaikutusta keskilämpötilaan hetkellisesti erityisesti inversiotilanteissa, vaikka muiden tekijöiden vaikutus onkin voimakkaampi pidemmällä aikavälillä (Suomi 2014). Vaikutus vaihtelee kaupunki- ja maaseutualueiden välillä siten, että matalalla sijaitsevat maaseutualueet ovat alttiimpia kylmien ilmassojen valumiselle kuin vastaavat kaupunkialueet (Kuttler ym. 1996). Siten topografian vaikutus voi näkyä myös Turussa, mutta kuukausikohtaisessa tarkastelussa sen vaikutus on heikko.

Topografian vaikutus kaupunkien ilmastoon vaihtelee eri kaupunkialueiden sijainnin mukaan. Yksittäisten pisteiden tilanteessa topografian vaikutus on todennäköisesti suurempi kuin koko regressiomallissa, jossa kaikkien havaintopisteiden vaikutusta tutkitaan yhdessä. Aiemmissä tutkimuksissa, kuten maaseudulla sijaitsevassa Niuskalan mittauspisteessä, on havaittu merkittävää topografian vaikutusta suhteessa lämpötilaan (Suomi & Käyhkö 2012). Topografian vaikutus ei ole yhtä huomattava kasvukauden aikana kuin normalisoidun kasvillisuusindeksin, vesialueiden tai maankäytön. Kuitenkin sen merkitys pitää ottaa huomioon, kun tarkastellaan kaupunkien ilmaston muutoksia. Siten olisi hyödyllistä tutkia jatkossa suhteellisen korkeuden vaikutusta esimerkiksi yksittäisissä mittauspisteissä hetkellisissä tilanteissa, jotta saataisiin syvempää ymmärrystä ilmiöstä.

Tutkimusalueella korkeimmat lämpötilat havaitaan kaupungin keskustassa ja alueilla, joissa maankäyttöön kuuluu kaupungeille ominaisia hyvin lämpöä varastoivia ja vapauttavia materiaaleja. Lisäksi tiheästi rakennetuilla alueilla lämpötilat ovat korkeammat verrattuna viheralueisiin tai maaseutumaisempiin alueisiin. Tässä tutkielmassa saatujen tulosten perusteella voidaan todeta, että kaupunkimaisella maankäytöllä on lämmittävä vaikutus keskilämpötilaan kasvukauden jokaisena kuukautena. Aiemmin Turun alueella on havaittu, että kaupunkimainen maankäyttö vaikuttaa keskilämpötilaan suhteessa eniten kasvukauden aikana (Suomi & Käyhkö 2012). Saadut tulokset ovat linjassa aiempien tutkimusten kanssa, ja ne osoittavat kaupunkimaisen maankäytön merkittävän roolin kaupunkien paikallisilmaston muokkaajana.

Tulosten perusteella kaupunkimaisen maankäytön vaikutus keskilämpötilaan on yhteneväinen aiempien tutkimusten kanssa. Kuitenkin normalisoidun kasvillisuusindeksin sisällyttäminen lineaariseen regressiomalliin vaikuttaa tuloksiin merkittävästi. Näin ollen kaupunkimaisen maankäytön vaikutus keskilämpötiloihin ei ole yhtä voimakas beta-kertoimilla mitattuna kuin on aiemmin havaittu, sillä myös NDVI-indeksillä on huomattava vaikutus keskilämpötilaan. NDVI-indeksin lisääminen regressiomalliin mahdollistaa uuden näkökulman tarkastella kaupunkialueiden lämpötilojen dynamiikkaa. Onkin tärkeää ymmärtää, miten kaupunkimainen maankäyttö ja siihen liittyvä kasvillisuus vaikuttavat lämpötilaan. Nämä vaikutukset voivat puolestaan vaikuttaa moniin ympäristötekijöihin, kuten ilmanlaatuun, energiankulutukseen ja ihmisten terveyteen (Koko ym. 2021).

Kaupunkialueiden lämpösaarekkeen kehittymistä voidaan selittää osittain kaupunkimaisella maankäytöllä, joka koostuu auringonsäteilyn lämpöenergiaa hyvin varastoivista ja vapauttavista rakennusmateriaaleista sekä rakennusten varjostusvaikutuksesta (Väyrynen ym. 2017). Tämä voi johtaa keskipäivällä kylmäsaarekkeen muodostumiseen, kun kaupungin keskustan ulkopuolella lämpötilat ovat keskustaa korkeampia (Suomi & Käyhkö 2012). Tieto kaupunkimaisen maankäytön merkityksestä lämpötilan vaihteluun auttaa esimerkiksi kaupunkien suunnittelussa sekä kehittämisessä kohti kestävämpää ja terveellisempää ympäristöä (Koko ym. 2021).

Kasvillisuuden ja kaupunkimaisen maankäytön välillä on osittain käänteinen suhde, mikä saattaa aiheuttaa multikollinearisuutta regressiomallissa. Multikollinearisuus viittaa tilanteeseen, jossa selittävien muuttujien välillä on liian korkea korrelaatio (Mellin 2006). Tässä tutkielmassa tarkasteltiin mallin luotettavuuden varmistamiseksi VIF-kertoimia, jotka mittaavat selittävien muuttujien keskinäistä riippuvuutta (Taanila 2020). Kuitenkin havaittiin, että VIF-kertoimet olivat niin alhaiset, että multikollinearisuudesta ei muodostunut ongelmaa, mikä vahvistaa tulosten luotettavuutta.

Kasvillisuuden ja keskilämpötilan korrelaatio on merkittävä koko kasvukauden ajan. Aiemmin on kuitenkin havaittu, että sadannalla on huomattava vaikutus keskilämpötilaan ja NDVI-indeksien arvoihin (Hao ym. 2008). Erityisesti kuivilla alueilla sadannalla voi olla huomattava vaikutus kasvillisuuteen ja siten myös keskilämpötilaan (Pei ym. 2019). Huomiot sadannan vaikutuksesta keskilämpötilaan ja NDVI-indeksien arvoihin auttavat kasvillisuuden ja ilmaston välisen suhteen ymmärtämisessä. Siten sadannan vaikutuksen selvittäminen lisäisi regressiomallien ja koko tutkielman luotettavuutta.

Jatkotutkimustarpeita tarkasteltaessa on olennaista huomioida useat näkökulmat kasvillisuuden vaikutuksesta paikallisilmastoon ja kaupunkien olosuhteisiin. Ensinnäkin voitaisiin suorittaa lisätutkimusta kontrollialueiden avulla viheralueiden vaikutusten arvioimiseksi. Erityisesti tulisi tutkia, miten viherrakentamisen lisääntyminen on muuttanut kaupungin ilmastoa, ja miten nämä muutokset vertautuvat aiempiin tilanteisiin. Toiseksi olisi tärkeää selvittää, miten erilaiset kasvillisuuden tyypit, kuten ruohot ja puut, vaikuttavat ympäröivään ilmastoon erityisesti lämpösaarekkeen näkökulmasta. On nimittäin havaittu, että eri kasvillisuuden tyypeillä on erilainen viilentävä vaikutus lämpötilaan (Krayenhoff ym. 2021). Jatkotutkimusta olisi hyödyllistä tehdä myös yksittäisissä havaintopisteissä, jotta voitaisiin selvittää tarkemmin,

miten kukin osatekijä vaikuttaa kyseisessä pisteessä. Lisäksi jatkotutkimusta tarvitaan kansanterveydellisten vaikutusten arvioimiseksi erityisesti suurissa kaupungeissa, joissa viheralueiden saavutettavuus voi vaihdella. Tämä auttaisi ymmärtämään paremmin viheralueiden terveysvaikutuksia, ja niiden merkitystä erityisesti hellejaksojen aikana.

Tutkielman lineaarisen regressiomallin tulokset osoittavat, että keskilämpötila voidaan selittää parhaiten kasvillisuuden ja maankäytön avulla kasvukauden aikana. Lisäksi vesialueiden vaikutus korostuu kasvukauden lopussa. Jatkossa ymmärrystä lämpötilaan vaikuttavista tekijöistä voitaisiin syventää tarkastelemalla kasvillisuuden ja muiden ominaisuustekijöiden suhdetta keskilämpötilaan pidemmällä aikavälillä. Esimerkiksi viimeisimmän ilmastollisen vertailukauden ajalta olisi mahdollista saada arvokasta tietoa muuttujien välisen yhteyden muutoksista. Tutkimusta on tehty hyödyntämällä pidempiä aikajaksoja ilmastonmuutoksen vaikutusten selvittämiseksi (Piao ym. 2003; Pei ym. 2019; Zhu ym. 2021). Näiden tekijöiden huomioiminen edistää ymmärrystä kaupunkien vaikutuksesta paikallisilmastoon, ja auttaa kehittämään kestävämpiä kaupunkiympäristöjä tulevaisuudessa.

6 Johtopäätökset

Tutkielmani tavoitteena oli syventää ymmärrystä kaupunki-ilmastoon vaikuttavista tekijöistä keskittyen Turun alueen paikallisilmaston dynamiikkaan. Tavoitteena oli selvittää kasvillisuuden, vesialueiden, topografian ja kaupunkimaisen maankäytön vaikutusta keskilämpötilaan vuosien 2020 ja 2021 kasvukausien aikana. Muuttujien välisten suhteiden suuntaa ja voimakkuutta keskityttiin selvittämään korrelaatioanalyysin sekä lineaarisen regressiomallin avulla. Lähestymistapa mahdollistaa kaupunkiympäristön ilmastovaikutusten kuvaamisen, ja auttaa ymmärtämään kaupunkirakennetta huomioiden lämpösaarekeilmiön sekä muiden tekijöiden vaikutukset.

Tutkimuksessa selvisi, että keskilämpötilan ja kasvillisuuden välillä on negatiivinen korrelaatio jokaisena kasvukauden kuukautena. Voimakkaimmillaan kasvillisuuden viilentävä vaikutus on kesä-heinäkuussa. Hellejaksojen aikana keskilämpötilan ja normalisoidun kasvillisuusindeksin välinen korrelaatio on voimakkaampi kuin useimmissa kuukausikohtaisissa tarkasteluissa. Lämpötilojen hillitsemisessä on tärkeää kiinnittää huomiota kasvillisuuden tyyppiin ja integroida viheralueet tehokkaasti osaksi kaupunkisuunnittelua. Erityisesti hellejaksojen aikana kasvillisuuden viilentävä vaikutus on merkityksellinen ihmisten hyvinvoinnin kannalta, mikä korostaa tarvetta säilyttää ja lisätä kasvillisuutta kaupunkiympäristössä.

Turun alueella lukuisat tekijät vaikuttavat lämpötilaan joko lämmittäen tai viilentäen sitä. Vesialueiden lämmittävä vaikutus korostuu syksyn aikana, kun kesän ja alkusyksyn aikana mereen varastoitunut lämpöenergia lämmittää rannikkoalueita. Topografian vaikutus keskilämpötilaan on heikoin, mutta todennäköisesti sen vaikutus korostuisi hetkellisissä tilanteissa ja yksittäisissä mittauspisteissä. Kaupunkimaisen maankäytön lämmittävä vaikutus korostuu alueilla, jossa maankäyttö on lämpöä tehokkaasti varastoivia ja vapauttavia materiaaleja. Kaupunkien ilmastotekijöiden tarkastelussa on huomioitava kaikki osatekijät ja niiden yhteisvaikutus, jotta voidaan saada kokonaisvaltainen kuva kaupunki-ilmastosta.

Lähteet

- Alvi U., Suomi, J. & Käyhkö, J. (2022) A cost-effective method for producing spatially continuous high-resolution air temperature information in urban environments. *Urban Climate* 42 101–123. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101123>
- Arsenault, É. & Bonn, F. (2005) Evaluation of soil erosion protective cover by crop residues using vegetation indices and spectral mixture analysis of multispectral and hyperspectral data. *Catena* 62(2–3) 157–172. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.05.003>
- Bowler, D. E., Buyung-Ali L., Knight T. M. & Pullin A. S. (2010) Urban greening to cool towns and cities: a systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning* 97(3) 147–55 <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006>
- Brutsaert, W. (2005) *Hydrology: an introduction*. Cambridge University, Cambridge.
- Cramer, W., Kicklighter, D. W., Bondeau, A., Moore III, B., Churkina, G., Nemry, B., Ruimy, A. & Schloss, A. L. (1999) Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): overview and key results. *Global Change Biology* 5 1–15. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.1999.00009.x>
- Drebs, A. (2011) Helsingin lämpösaareke ajallisena ja paikallisena ilmiönä. Pro gradu -tutkielma. Helsingin yliopisto, geotieteiden ja maantieteen laitos. <https://helda.helsinki.fi/server/api/core/bitstreams/7cfd1754-580e-448a-89c0-774566e6eee8/content>
- Drebs A., Suomi J. & Mäkelä A. (2023) Urban heat island research at high latitudes – utilizing Finland as an example. *Boreal Environment Research* 28 81–96. https://www.researchgate.net/publication/370025041_Urban_heat_island_research_at_high_latitudes_-_utilising_Finland_as_an_example
- Gentili, J. O., Fernández, M. E. & Gil, V. (2020) Influence of Topography on Local Atmospheric Features in a Peri-urban Area of Bahía Blanca (Argentina). *Environmental Processes* 7(1) 23–40. <https://doi.org/10.1007/s40710-019-00408-4>
- Goldreich, Y. (1984) Urban topoclimatology. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 8(3) 336–364. <https://doi.org/10.1177/030913338400800302>
- Hao, F., Zhang, X., Ouyang, W., Skidmore, A. K. & Toxopeus, A. G. (2012) Vegetation NDVI Linked to Temperature and Precipitation in the Upper Catchments of Yellow River. *Environmental Modeling & Assessment* 17(4) 389–398. <https://doi.org/10.1007/s10666-011-9297-8>

- Holden, J. (2017) Introduction to Physical Geography and the Environment. 4. p. Pearson, Harlow.
- Kawabata, A., Ichii, K. & Yamaguchi, Y. (2001) Global monitoring of interannual changes in vegetation activities using NDVI and its relationships to temperature and precipitation. *International Journal of Remote Sensing* 22(7) 1377–1382.
<https://doi.org/10.1080/01431160119381>
- Käyhkö, N. & Skånes, H. (2008) Retrospective land cover/land use change trajectories as drivers behind the local distribution and abundance patterns of oaks in south-western Finland. *Landscape and Urban Planning* 88(1) 12–22
<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2008.07.003>
- Kersalo, J. & Pirinen, P. (2009) *Suomen maakuntien ilmasto*. Ilmatieteenlaitoksen raportteja. Ilmatieteen laitos, Helsinki. 24.1.2024.
 <<https://helda.helsinki.fi/server/api/core/bitstreams/c35a61a8-47e8-407f-8286-045cc5888d83/content>>
- Koko, A. F., Wu, Y., Abubakar, G. A., Hamed, R. & Bello, M. (2021) Thirty Years of Land Use/Land Cover Changes and Their Impact on Urban Climate: A Study of Kano Metropolis, Nigeria. *Land* 10(11). <https://doi.org/10.3390/land10111106>
- Korkeusmalli 25 m (2013) Maanmittauslaitos. 2.4.2024.
 <<https://ckan.ymparisto.fi/dataset/korkeusmalli-25-m>>
- Krayenhoff, E. S., Broadbent, A. M., Zhao, L., Georgescu, M., Middel, A., Voogt, J., Martilli, A., Sailor, D. J. & Erell, E. (2021) Cooling hot cities: a systematic and critical review of the numerical modelling literature. *Environmental Research Letters* 16.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/abdcf1>
- Kuttler W., Barlag A.-B. & Robmann F. (1996) Study of the thermal structure of a town in a narrow valley. *Atmospheric Environment* 30(3) 365–378. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(94\)00271-1](https://doi.org/10.1016/1352-2310(94)00271-1)
- Lima Alves, E. & Lopes, A. (2017) The Urban Heat Island Effect and the Role of Vegetation to Address the Negative Impacts of Local Climate Changes in a Small Brazilian City. *Atmosphere* 8(2) 18. <https://doi.org/10.3390/atmos8020018>
- Lin, B., Li, X., Zhu, Y. & Qin, Y. (2008) Numerical simulation studies of the different vegetation patterns' effects on outdoor pedestrian thermal comfort. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 96(10–11) 1707–1718.
<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2008.02.006>

- Mellin, I. (2006) *Tilastolliset menetelmät, Lineaarinen regressioanalyysi*. TKK. 12.2.2024.
<<https://math.aalto.fi/opetus/sovtoda/oppikirja/Regranal.pdf>>
- Myneni, R., Keeling, C., Tucker, C., Asrar, G. & Nemani, R. R. (1997) Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature* 386(6626) 698–702.
<https://doi.org/10.1038/386698a0>
- Oke, T. R. (1973) City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment* 7(8) 769-779. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(73\)90140-6](https://doi.org/10.1016/0004-6981(73)90140-6)
- Oke, T. R. (1987) *Boundary Layer Climates*. 2. p. Routledge, London.
- Oleson, K. W., Bonan G. B., Feddema, J. & Jackson, T. (2011) An examination of urban heat island characteristics in a global climate model. *International Journal of Climatology* 31(12) 1848–1865. <https://doi.org/10.1002/joc.2201>
- Peel, M. C. M., Finlayson, B. L. & McMahon, T. A. (2007) Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 11(5) 1633–1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- Piao, S., Fang, J., Zhou, L., Guo, Q., Henderson, M., Ji, W., Li, Y. & Tao, S. (2003) Interannual variations of monthly and seasonal normalized difference vegetation index (NDVI) in China from 1982 to 1999. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 108 28–48 <https://doi.org/10.1029/2002JD002848>
- Qiu, G.-Y., Li, H.-Y., Zhang, Q.-T., Chan, W., Liang, X.-J. & Li, X.-Z. (2013) Effects of Evapotranspiration on Mitigation of Urban Temperature by Vegetation and Urban Agriculture. *Journal of Integrative Agriculture* 12(8) 1307–1315.
[https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(13\)60543-2](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(13)60543-2)
- Rautiainen, M., Nilson, T. & Lökk, T. (2009) Seasonal reflectance trends of hemiboreal birch forests. *Remote Sensing of Environment* 113(4) 805–815.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.12.009>
- Ruosteenoja, K., Räisänen, J., Venäläinen, A., Kämäräinen, M. & Pirinen, P. (2016). Terminen kasvukausi lämpenevässä ilmastossa. *Terra* 128(1) 3–15
<https://doi.org/10.1002/joc.4535>
- Sentinel-2 (2012) European Space Agency. 11.2.2024.
https://sentinel.esa.int/documents/247904/349490/s2_sp-1322_2.pdf
- SLICES 2010, 10mx10m, generalized raster* (2020) Maanmittauslaitos, Fairdata. 24.1.2024.
<<https://etsin.fairdata.fi/dataset/f7ad15a1-7e0e-4dc7-b4ba-ad6f1d225cbd>>

- Suomi, J. & Käyhkö, J. (2012) The impact of environmental factors on urban temperature variability in the coastal city of Turku, SW Finland. *International journal of climatology* 32(3) 451–463. <https://doi.org/10.1002/joc.2277>
- Suomi, J., Hjort, J. & Käyhkö, J. (2012) Effects of scale on modelling the urban heat island in Turku, SW Finland. *Climate Research* 55(2) 105–118. <https://doi.org/10.3354/cr01123>
- Suomi, J. (2014) Characteristics of Urban Heat Island (UHI) In A High-Latitude Coastal City – A Case Study of Turku, SW Finland. *Turun yliopiston julkaisuja* 295. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-951-29-5912-9>
- Suomi, J. (2022) Data tutuksi: Turun yliopiston dataa keskilämpötiloista Turun alueella. Lounaistieto 17.1.2024. <<https://www.lounaistieto.fi/data-tutuksi-turun-yliopiston-dataa-keskilampotiloista-turun-alueella/>>
- Taanila, A. (2020) *Lineaariset regressiomallit*. 25.2.2024 <<https://taanila.fi/regressio.pdf>>
- Turku Urban Climate Research Group (2022) University of Turku, Turku. 3.2.2024. <<https://sites.utu.fi/turclim/>>
- Väyrynen, R., Suomi, J. & Käyhkö, J. (2017) Fine-scale analysis of sea effect on coastal air temperatures at different time scales. *Boreal Environment Research* 22(1–6) 369–383.
- Wang, H., Li, Z., Niu, Y., Li, Z., Cao, L., Feng, R., He, Q., Pan, Y. (2022) Evolution and Climate Drivers of NDVI of Natural Vegetation during the Growing Season in the Arid Region of Northwest China. *Forests* 13(7) 1082. <https://doi.org/10.3390/f13071082>
- Wang, Y., Zhao, D. & Ma, Q. (2023) Developing Comprehensive Local Climate Zone Land Use Datasets for Advanced High-Resolution Urban Climate and Environmental Modeling. *Remote Sensing* 15(12) 3111. <https://doi.org/10.3390/rs15123111>
- Wilby, R.L. (2007) A Review of Climate Change Impacts on the Built Environment. *Built Environment* 33(1) 31-45. <https://doi.org/10.2148/benv.33.1.31>
- Yang, J., Shi, Q., Menenti, M., Xie, Y., Wu, Z., Xu, Y. & Abbas, S. (2022) Characterizing the thermal effects of vegetation on urban surface temperature. *Urban Climate* 44 101204. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101204>
- Zhou, D., Zhang, L., Huang, D. & Zhu, C. (2016) Climate–vegetation control on the diurnal and seasonal variations of surface urban heat islands in China. *Environmental Research Letters* 11(7) 074009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/7/074009>