

<https://doi.org/10.15388/vu.thesis.483>

<https://orcid.org/0000-0001-9057-7177>

VILNIAUS UNIVERSITETAS
GAMTOS TYRIMŲ CENTRAS
KLAIPĖDOS UNIVERSITETAS

Viktorija Mačiulytė

Meteorologinių sąlygų poveikio dirvožemio drėgmei vertinimas

DAKTARO DISERTACIJA

Gamtos mokslai,
Fizinė geografija (N 006)

VILNIUS 2023

Disertacija rengta 2017–2022 metais Vilniaus universitete.

Mokslinis vadovas – prof. dr. Egidijos Rimkus (Vilniaus universitetas, gamtos mokslai, fizinė geografija – N 006).

Mokslinis konsultantas – prof. dr. Edvinas Stonevičius (Vilniaus universitetas, gamtos mokslai, fizinė geografija – N 006).

Gynimo taryba:

Pirmininkas – doc. dr. Donatas Pupienis (Vilniaus universitetas, gamtos mokslai, fizinė geografija – N 006).

Nariai:

prof. dr. Agrita Briede (Latvijos universitetas, gamtos mokslai, fizinė geografija – N 006),

dr. Virgijija Gregorauskienė (Lietuvos geologijos tarnyba, gamtos mokslai, fizinė geografija – N 006),

dr. Laurynas Jukna (Vilniaus universitetas, gamtos mokslai, fizinė geografija – N 006),

prof. dr. Loreta Kelpšaitė-Rimkienė (Klaipėdos universitetas, gamtos mokslai, fizinė geografija – N 006).

Disertacija ginama viešame Gynimo tarybos posėdyje 2023 m. birželio mėn. 22 d. 12.00 val. Chemijos ir geomokslų fakulteto Geomokslų instituto 313 auditorijoje. M. K. Čiurlionio g. 21, 313 a., Vilnius, Lietuva, tel. +(370 5) 239 8292.

Disertaciją galima peržiūrėti Gamtos tyrimų centro, Klaipėdos universiteto, Vilniaus universiteto bibliotekose ir VU interneto svetainėje adresu: <https://www.vu.lt/naujienos/ivykiu-kalendorius>

<https://doi.org/10.15388/vu.thesis.483>

<https://orcid.org/0000-0001-9057-7177>

VILNIUS UNIVERSITY
NATURE RESEARCH CENTRE
KLAIPEDA UNIVERSITY

Viktorija Mačiulytė

Assessing the Impact of Meteorological Conditions on Soil Moisture

DOCTORAL DISSERTATION

Natural Sciences,
Physical Geography (N 006)

VILNIUS 2023

The dissertation was prepared between 2017 and 2022 at Vilnius University.

Academic supervisor – Prof. Dr. Egidijus Rimkus (Vilnius University, Nature Sciences, Physical Geography – N 006).

Academic consultant – Prof. Dr. Edvinas Stonevičius (Vilnius University, Nature Sciences, Physical Geography – N 006).

This doctoral dissertation will be defended in a public meeting of the Dissertation Defence Panel:

Chairman – Assoc. Prof. Dr. Donatas Pupienis (Vilnius University, Nature Sciences, Physical Geography – N 006).

Members:

Prof. Dr. Agrita Briede (University of Latvia, Nature Sciences, Physical Geography – N 006),

Dr. Virgilija Gregorauskienė (Lithuanian Geological Survey, Nature Sciences, Physical Geography – N 006),

Dr. Laurynas Jukna (Vilnius University, Nature Sciences, Physical Geography – N 006),

Prof. Dr. Loreta Kelpšaitė-Rimkienė (Klaipeda University, Nature Sciences, Physical Geography – N 006).

The dissertation shall be defended at a public meeting of the Dissertation Defence Panel at 12:00 on 22nd of June 2023 in Room 313 of Vilnius University's Faculty of Chemistry and Geosciences, Institute of Geosciences. Address: 21 M. K. Čiurlionis str., Vilnius, Lithuania.

Phone No.: +(370 5) 239 8292.

The text of this dissertation can be accessed at the libraries of Klaipeda University, the Nature Research Centre and Vilnius University, as well as on the website of Vilnius University:

www.vu.lt/lt/naujienos/ivykiu-kalendorius

SANTRUMPOS IR DAŽNIAUSIAI VARTOJAMOS SĄVOKOS

| Santrumpa arba sąvoka | Paiškinimas |
|---|---|
| Drėgnas periodas dirvožemyje | Laikotarpis, kada dirvožemio drėgmė konkrečiame analizuojamos teritorijos taške buvo didesnė nei 95-tas arba 90-tas konkretaus metų laiko drėgmės procentilis, nustatytas pagal daugiamečius 1951–2020 metų duomenis. |
| ESA CCI SM | Europos kosmoso agentūros klimato kaitos iniciatyvos palydovinis dirvožemio drėgmės produktas (angl. <i>European Space Agency Climate Change Initiative Soil Moisture</i> , https://esa-soilmoisture-cci.org). |
| ESDAC | Europos dirvožemio duomenų centras (angl. <i>European Soil Data Centre</i> , https://esdac.jrc.ec.europa.eu). |
| Ilgas lietingas laikotarpis | Pagal oficialų kriterijų (kai 60 dienų kritulių suma viršija ILL_{ref} ribą) išskirtas perteklinio kritulių kiekio laikotarpis. |
| ILL_{ref} | Kiekvienai gegužės–spalio dienai priskirta 60 dienų kritulių sumos riba, kurią viršijus identifikuojamas ilgas lietingas laikotarpis. |
| RCP | Tipiniai klimato kaitos scenarijai (angl. <i>Representative Concentration Pathways</i>). |
| Sausas periodas dirvožemyje | Laikotarpis, kai dirvožemio drėgmė konkrečiame analizuojamos teritorijos taške buvo mažesnė nei 5-tas arba 10-tas konkretaus metų laiko drėgmės procentilis, nustatytas pagal daugiamečius 1951–2020 metų duomenis. |
| RMSE | Vidutinė kvadratinė paklaida (angl. <i>Root Mean Square Error</i>) yra standartinis būdas įvertinti modelio išvesties duomenų nuokrypį nuo matavimo duomenų. Apskaičiuojamas kaip šaknis iš nuokrypių kvadratų vidurkio. |
| Sausra | Šiame tyrime sausra išskiriama pagal oficialų TPI15 (pavojinga sausra) ar TPI30 (stichinė sausra) kriterijų. |
| SSM | Žemės stebėjimo programos „Copernicus“ palydovinis paviršiaus dirvožemio drėgmės produktas (angl. <i>Surface Soil Moisture</i> , https://land.copernicus.eu/global/products/ssm). |
| SWAP | Modelis, skirtas vandens, tirpių medžiagų ir šilumos sklidimui dirvožemyje imituoti, vertinant sąveiką tarp dirvožemio, vandens, augalijos ir atmosferos (angl. <i>Soil Water Atmosphere Plant</i> , https://www.swap.alterra.nl/). |
| TPI_{d10} , TPI_{d20} , TPI_{d30} | Kasdieninis temperatūros ir kritulių indeksas, skaičiuojamas iš paskutinių 10, 20 ir 30 dienų (atitinkamai) laikotarpio. |
| TPI_{15} , TPI_{30} | Kasdieninio TPI_{d30} 15 ir 30 dienų (atitinkamai) slenkantis vidurkis, skirtas pavojingai ir stichinei sausrui (atitinkamai) identifikuoti. |

TURINYS

| | |
|--|-----|
| ĮVADAS | 8 |
| 1. LITERATŪROS APŽVALGA | 17 |
| 1.1. Dirvožemio drėgmės samprata..... | 17 |
| 1.2. Dirvožemio drėgmės matavimai | 25 |
| 1.3. Dirvožemio drėgmės modeliavimas..... | 29 |
| 1.4. Dirvožemio drėgmės tyrimai Europoje ir Lietuvoje | 32 |
| 2. DUOMENYS IR METODIKA | 37 |
| 2.1. Dirvožemio drėgmės modeliavimas SWAP modeliu..... | 37 |
| 2.1.1. Modelio aprašymas bei įvesties ir išvesties duomenys | 37 |
| 2.1.2. Modelio kalibravimas ir validavimas..... | 43 |
| 2.2. Pradiniai duomenys..... | 44 |
| 2.2.1. Pradiniai dirvožemio drėgmės duomenys | 44 |
| 2.2.2. Pradiniai meteorologiniai duomenys..... | 48 |
| 2.3. Meteorologinių ir dirvožemio drėgmės sąlygų analizė ir vertinimas ... | 49 |
| 2.4. Palydovinių dirvožemio drėgmės reikšmių palyginimas su SWAP modeliuota drėgme..... | 54 |
| 2.5. Prognozuojamų klimato pokyčių poveikis dirvožemio drėgmei..... | 59 |
| 3. REZULTATAI..... | 61 |
| 3.1. SWAP modelio tinkamumo dirvožemio drėgmės tyrimams vertinimas..... | 61 |
| 3.2. Oro temperatūra, krituliai ir dirvožemio drėgmė Lietuvoje..... | 66 |
| 3.2.1. Oro temperatūra ir kritulių kiekis..... | 66 |
| 3.2.2. Sausros ir lietingi laikotarpiai | 69 |
| 3.2.3. Dirvožemio drėgmė..... | 72 |
| 3.3. Ryšys tarp meteorologinių rodiklių ir dirvožemio drėgmės..... | 75 |
| 3.4. Gausių kritulių ir periodų be kritulių ryšys su dirvožemio drėgme ... | 80 |
| 3.4.1. Gausių kritulių poveikis dirvožemio drėgmei..... | 80 |
| 3.4.2. Laikotarpių be lietaus poveikis dirvožemio drėgmei | 85 |
| 3.5. Dirvožemio drėgmė ekstremalių meteorologinių sąlygų metu | 90 |
| 3.5.1. Sausros pagal TPI30 ir sausi periodai dirvožemyje | 90 |
| 3.5.2. Ilgi lietingi laikotarpiai ir drėgni periodai dirvožemyje | 100 |
| 3.6. Žemės ūkio augalų derlingumas ekstremalių drėgmės sąlygų metu..... | 109 |

| | |
|---|-----|
| 3.7. Palydovinės ir SWAP modelio dirvožemio drėgmės palyginimas | 117 |
| 3.8. Prognozuojami dirvožemio drėgmės pokyčiai XXI amžiuje | 123 |
| 3.8.1. Oro temperatūros, kritulių ir dirvožemio drėgmės prognozės | 124 |
| 3.8.2. Ekstremalių meteorologinių sąlygų pasikartojimas ir dirvožemio drėgmė jų metu..... | 129 |
| IŠVADOS..... | 133 |
| LITERATŪROS SĄRAŠAS..... | 135 |
| PRIEDAI | 158 |
| SUMMARY | 177 |
| CURRICULUM VITAE | 200 |
| PADĖKA..... | 201 |
| PUBLIKACIJŲ SĄRAŠAS | 202 |

ĮVADAS

Dirvožemio drėgmė yra svarbi aplinkos ir hidrologinio balanso dalis. Nuo 2010 metų dirvožemio drėgmė Pasaulinės meteorologijos organizacijos priskirta prie svarbiausių klimato rodiklių (ECV, angl. *Essential Climate Variables*) (WMO, 2010). ECV sąrašą sudaro fiziniai, cheminiai ar biologiniai rodikliai arba jų grupės, kurios padeda apibūdinti Žemės klimatą siekiant suprasti ir prognozuoti klimato raidą, įvertinti rizikas ir suprasti bei taikyti klimato švelninimo ir prisitaikymo priemones (WMO, 2022). Šiuo metu yra išskirti 54 svarbiausi klimato rodikliai. Į ECV sąrašą dirvožemio drėgmė įtraukta dėl įtakos sausumos–atmosferos grįžtamiesiems ryšiams, reguliuojant šiluminį balansą bei kritulių perskirstymą per nuotėkį ir infiltraciją. Siekiant valdyti vandens išteklius ir stebėti poveikį aplinkai, dirvožemio drėgmės matavimai yra labai svarbūs (WMO, 2010).

Dirvožemio drėgmė siejasi su įvairiomis sritimis. Drėgmė yra hidrologinio ciklo dalis, susijusi su požeminiais (Martínez-de la Torre ir Miguez-Macho, 2019) ir paviršiniaus vandenimis (Immerzeel ir kt., 2009) ir reguliuojanti kritulių poveikį upių nuotėkiui (Uber ir kt., 2018). Kartu drėgmė gali daryti poveikį ir tokioms praktinėms sritims kaip energetika, nes reguliuoja hidroelektrinių nuotėkį, ar miškininkystė, nes turi įtakos medžių būklei (von Arx ir kt., 2013).

Dirvožemio drėgmė yra tarpusavio grįžtamaisiais ryšiais susijusi su atmosferos cirkuliacija, šilumos balansu atmosferoje, atmosferos nestabilumu (Cheng ir Chen, 2018; Dong ir kt., 2022; Erdenebat ir Sato, 2018; Hong ir Pan, 2000), žaibavimu (Kumar ir kt., 2016), su temperatūros ir kritulių ekstremumais (Jaeger ir Seneviratne, 2011). Dėl to dirvožemio drėgmė yra svarbus orų ir klimato modeliavimo komponentas, siekiant pagerinti prognozių kokybę (van den Hurk ir kt., 2012). Taip pat šis komponentas svarbus ekosistemoms ir jų būklei išlaikyti, būtinas florai ir faunai. Jis yra neatsiejamas nuo kraštovaizdžio, nes reguliuoja dirvožemio savybes, įvairių medžiagų balansą (Eberhard ir kt., 2020; Visser ir kt., 2012) ir susijęs su dirvožemio struktūra, jo atsparumu erozijai (Moragoda ir kt., 2022).

Nors dirvožemio drėgmė yra svarbi išvardytiems aplinkos procesams, ekosistemos būklei ir daro poveikį įvairiems ekonominiams sektoriams, dažniau analizuojama jos svarba ir poveikis žemės ūkiui.

Optimalus drėgmės kiekis užtikrina tinkamą mikroelementų pasiskirstymą per augalą ir tokių fiziologinių augalo procesų kaip fotosintezė ir termoreguliacija funkcionavimą (Butkevičienė, 2018). Dirvožemio drėgmės stygius esant sausoms sąlygoms gali sukelti šių procesų sutrikimų, riboti augalų produktyvumą ir augimo fazių metu, kai augalai jautriausi, padaryti

negrįžtamos žalos (Cohen ir kt., 2021; Daryanto ir kt., 2017; Holsten ir kt., 2009; Pileckaitė, 2012). Kitas drėgmės ekstremumas – perteklinis dirvožemio drėgnumas (užmirkimas), kai dirvožemis ilgesnį laiką užpildomas vandeniu, taip pat gali paveikti augalų būklę ribojant deguonies ir maistinių medžiagų įsisavinimą (Akhtar ir Nazir, 2013). Dėl to mažiau nei savaitę trukęs šaknų užmirkimas gali sukelti morfologinių augalo pokyčių, o poveikis gali būti stipresnis esant ankstyvesnei augimo fazei (Huang ir kt., 2022). Nėgana to, pernelyg drėgną dirvožemį sunkiau įdirbti (Sakalauskas ir kt., 2012) tiek vykdant įvairius žemės ūkio darbus, tiek prižiūrint augalus ar nuimant derlių.

Dirvožemio drėgmės režimas priklauso nuo meteorologinių sąlygų ir kitų veiksnių. Ypač svarbi yra dirvožemio granulimetrinė sudėtis, lemianti drėgmės imlumą (Costa ir kt., 2013) bei infiltraciją (Farrar ir kt., 1994; Pereira ir Novara, 2014), augalinės dangos tipas (Zhang ir kt., 2010) ir požeminio vandens lygis (Martínez-de la Torre ir Miguez-Macho, 2019). Be to, ne visas vanduo, esantis dirvožemyje, yra prieinamas augalams (Brouwer ir kt., 1985; Taparauskienė ir kt., 2013), o vandens prieinamumas taip pat priklauso nuo dirvožemio savybių (Navickas, 2008). Dėl tokios dirvožemio drėgmę lemiančių faktorių gausos vien tik meteorologiniai rodikliai negali apibūdinti dirvožemio būklės, tam būtini dirvožemio drėgmės matavimų duomenys.

Lietuvoje agrometeorologiniai stebėjimai yra nenuoseklūs. Pirmasis matavimų tinklas veikė XX amžiuje ir 2000 metais buvo uždarytas. Beveik po dešimtmečio, nuo 2009 metų, pradėti vykdyti automatiniai dirvožemio drėgmės matavimai, nepasižymėję itin aukšta duomenų kokybe (Nacionalinė mokėjimo..., 2018), ir šie stebėjimai buvo vykdyti tik iki 2020 metų. Todėl sausos ir drėgnos sąlygos Lietuvoje identifikuojamos remiantis tik kritulių ir temperatūros duomenimis (Lietuvos Respublikos..., 2020).

Dirvožemio drėgmės duomenų ir su jais susijusių tyrimų svarba neabejojama klimato kaitos kontekste. Iš esmės klimato atšilimas Lietuvoje gali turėti teigiamą poveikį augalininkystei, tačiau tik tuo atveju, jei kartu augs ir kritulių kiekis (Povilaitis ir kt., 2009). Jau dabar didelėje Pietų ir Rytų Europos dalyje sausros tampa dažnesnės ir stipresnės (Spinoni ir kt., 2017), mažėja dirvožemio drėgmė (Almendra-Martín ir kt., 2022). Tikėtina, jog dirvožemio drėgmė gali ir toliau mažėti XXI amžiuje, o pokyčių dydis ar net ženklas gali priklausyti nuo dirvožemio granulimetrinės sudėties ir sezono (Stonevičius ir kt., 2008).

Lietuvoje mokslinių tyrimų, skirtų daugiausia dirvožemio drėgmei, nėra daug. Pavieniuose tyrimuose galima rasti gravimetriniu metodu (Buitkuvienė, 1999) ar automatiniiais drėgmės matavimo prietaisais išmatuotos drėgmės (Taparauskienė ir kt., 2013; Valiukas, 2015) analizę. Paskutiniu metu daugiau dėmesio skiriama sausros indeksais išskiriamų sąlygų ir palydoviniiais

metodais išmatuotų duomenų tyrimams (Jaagus ir kt., 2021; Klimavičius ir kt., 2020; Rimkus ir kt., 2013; Rimkus ir kt., 2017).

Dėl klimato kaitos keičiasi dirvožemio drėgmės režimas globaliu mastu: vieni regionai tampa sausesni, kiti – drėgnesni, ir šios tendencijos išliks ir ateityje (Qin, ir kt., 2023). Dėl to šiuo metu ypatingai daug dėmesio skiriama klimato kaitos tyrimams: vertinama, kaip klimatas keitėsi praeityje, ir prognozuojama, kokie galimi klimato pokyčiai ateityje (Cholet ir kt., 2022; Mimeau ir kt., 2021; Zare ir kt., 2022).

Globaliu mastu vieni iš dažniausių dirvožemio drėgmės tyrimų yra dirvožemio drėgmės nustatymo ir matavimo galimybių vertinimas (Yu ir kt., 2021; Rasheed ir kt., 2022). Šioje srityje vyrauja dirvožemio drėgmės nustatymas palydoviniais metodais, pasitelkus mašininį mokymąsi (Celik ir kt., 2022) bei neuroninius tinklus (Karamouz ir kt., 2022), siekiant prognozuoti ar pagerinti duomenų kokybę sukūrus homogeniškas duomenų sekas (Skulovich ir Gentine, 2023).

Taip pat daug dėmesio skiriama dirvožemio drėgmės modeliavimui, kuris gali padėti įvertinti dirvožemio drėgmę, neretai taikant tiek palydovinius, tiek *in situ* matavimus (A ir kt., 2022; Liu ir kt., 2022; Sungmin ir Orth, 2021). Atskirais atvejais modelio duomenimis grįstas drėgmės vertinimas gali būti netgi tikslesnis nei grįstas tiesioginiais matavimais (Wicki ir kt., 2021). Neabejotinai matavimai yra svarbūs norint modelius tinkamai kalibruoti ir validuoti (Kim ir kt., 2015; Ma ir kt., 2011; Martinez-Ferri ir kt., 2013). Be to, kai kuriais atvejais modelių prognozuoti drėgmę galima turint bent vieną dirvožemio drėgmės matavimo reikšmę, kuri tampa atskaitos tašku (Reintam ir kt., 2016), todėl matavimų svarba vis tiek išlieka.

Vienas iš modelių, leidžiančių įvertinti vertikalius vandens, tirpiųjų medžiagų ir šilumos srautus dirvožemyje, yra SWAP (angl. *Soil Water Atmosphere Plant*) modelis (Kroes ir kt., 2017). Šis modelis yra taikomas įvairiuose dirvožemio drėgmės, augalijos (Jones ir kt., 2000; Martinez-Ferri ir kt., 2013; Wang ir kt., 2020; Wang ir kt., 2021; Zhao ir kt., 2020), klimato kaitos poveikio augalams (Bartholomeus ir kt., 2011; Wanti, 2012), vandens suvartojimo vertinimo (Liu ir kt., 2019), upių vandens lygio (Immerzeel ir kt., 2009) bei cheminių medžiagų dirvožemyje pokyčių tyrimams (Eberhard ir kt., 2020; Visser ir kt., 2012). Lietuvoje SWAP modelis taip pat yra bandytas ir nustatyta, kad jis tinkamas vandens ir įvairių medžiagų kiekiui dirvožemyje modeliuoti (Taparauskienė, 2005; Taparauskienė ir Heng, 2008).

SWAP yra vienos dimensijos modelis, kuriuo galima atlikti vertikalų vandens, tirpiųjų medžiagų ir šilumos transporto modeliavimą nuo viršutinės augalijos dalies iki požeminio vandens sluoksnio viršaus. SWAP įtraukia dirvožemio, augalijos, atmosferos ir vandens tarpusavio sąveikas, jo veikimas

parentas Ričardso (Richards) lygtimi, skirta vertikaliam vandens srautui dirvožemyje skaičiuoti (Kroes ir kt., 2017). Vienas iš pagrindinių privalumų yra tas, kad modeliavimą galima atlikti minimizavus modelio parametrus ir pradinius įvesties duomenis. Modelis sudarytas iš įvairių modulių, kuriuos galima pasirinkti pagal tyrimo tikslą (Kroes ir kt., 2017).

Disertacijoje atliekamas ilgą praeities laikotarpį (1951–2020 metus) apimantis dirvožemio drėgmės modeliavimas SWAP modeliu. Taip pat, remiantis klimato prognozių duomenimis, atliekamas dirvožemio drėgmės modeliavimas vertinant drėgmės pokyčius XXI amžiuje. Modelio išvesties duomenys naudojami sausiams ir drėgniems periodams dirvožemyje išskirti ir poveikiui drėgmei įvertinti sausrų ir lietingų periodų metu.

Darbo objektas – dirvožemio drėgmė Lietuvos teritorijoje 1951–2099 metais.

Darbo tikslas – atlikti dirvožemio drėgmės Lietuvoje modeliavimą SWAP modeliu priemolinguose ir priemėlinguose dirvožemiuose ir įvertinti ekstremalių meteorologinių sąlygų poveikį dirvožemio drėgmei.

Darbo uždaviniai

1. Atlikti SWAP modelio kalibravimą ir validavimą priemolinguose ir priemėlinguose dirvožemiuose Lietuvoje ir įvertinti modelio tinkamumą.
2. Įvertinti dirvožemio drėgmės pokyčius Lietuvoje 1951–2020 metais ir nustatyti meteorologines sąlygas, lemiančias dirvožemio drėgmės režimą.
3. Remiantis modeliavimo rezultatais, išskirti ekstremaliai sausus ir drėgnus periodus dirvožemyje 1951–2020 metais, juos susieti su meteorologinėmis sąlygomis, buvusiomis sausrų ir ilgų lietingų laikotarpių metu.
4. Išanalizuoti žemės ūkio augalų derlingumo sąsajas su dirvožemio drėgmės anomalijomis.
5. Remiantis SWAP modelio drėgme įvertinti palydovinių dirvožemio drėgmės produktų panaudojimo galimybes.
6. Sudaryti dirvožemio drėgmės pokyčių iki XXI amžiaus pabaigos prognozes.

Ginami teiginiai

1. SWAP modelis yra tinkamas dirvožemio drėgmei modeliuoti ir drėgmės dinamikai Lietuvos teritorijoje vertinti.
2. Sausi ir drėgni periodai dirvožemyje, gauti iš SWAP modelio drėgmės duomenų, gali tiksliau įvertinti ekstremalių sąlygų poveikį drėgmei nei temperatūros ir kritulių indeksai.

3. Sausi ir drėgni periodai dirvožemyje dažniau neigiamai veikia žemės ūkio augalų derlingumą, tačiau poveikio mastas priklauso nuo jų susiformavimo laiko augalų vegetatyvinės fazės atžvilgiu.
4. Palydovinė dirvožemio drėgmės informacija, palyginti su drėgme, apskaičiuota SWAP modeliu, nusileidžia kokybe ir patikimumu.
5. Iki XXI amžiaus pabaigos kritulių kiekio pokyčių ženklas nuolatiniame oro temperatūros kilimo kontekste nulems viršutinio dirvožemio sluoksnio drėgmės ir jos ekstremalumo pokyčius.

Darbo naujumas

Šiame tyrime atliekamas dirvožemio drėgmės vertinimas pasitelkiant SWAP modelį, kuris iki šiol Lietuvoje nebuvo plačiai taikytas (Taparauskienė, 2005; Taparauskienė ir Heng, 2008).

Modelio kalibravimas ir validavimas atliktas naudojant patikimus gravimetriniu metodu (svėrimo) išmatuotus dirvožemio drėgmės duomenis, todėl modeliavimas pasižymi didesniu patikimumu. Tyrime parodoma, kad, turint praityje išmatuotus duomenis ir iš įvairių šaltinių surinktą informaciją apie dirvožemio savybes, galima gana tiksliai atlikti praities laikotarpių modeliavimą, o naudojant klimato prognozių duomenis įvertinti pokyčius ateityje.

Atliktas drėgmės modeliavimas apima 1951–2020 metų laikotarpį, o anksčiau Lietuvoje nebuvo atlikta tokio ilgo laikotarpio skirtingos granulometrinės sudėties dirvožemių modeliavimo. Toks ilgas analizuojamas laikotarpis leidžia daryti patikimesnes išvadas apie dirvožemio drėgmės rodiklių kaitą tiek tiriant pokyčius šiltojo sezono metu, tiek vertinant daugiametę dirvožemio drėgmės dinamiką.

Iki šiol Lietuvoje dar nebuvo nagrinėta, kokios dirvožemio drėgmės sąlygos vyrauja sausrų ir ilgų lietingų laikotarpių metu. Būtent tyrimo metu atliktas drėgmės modeliavimas leidžia įvertinti, kokios dirvožemio drėgmės sąlygos buvo per ekstremalius reiškinius, dėl to tyrimo rezultatai prisideda prie agrometeorologinio sausros ir perteklinio drėkinimo krituliais poveikio vertinimo.

Taip pat tyrime SWAP modelio išvesties duomenys panaudoti palydovinių dirvožemio drėgmės produktų panaudojimo galimybėms vertinti, o tai Lietuvoje taikant tokią metodiką iki šiol irgi nėra daryta. Remiantis klimato kaitos modelių išvesties duomenimis, buvo sudarytos dirvožemio drėgmės kaitos XXI amžiuje prognozės ir įvertinti galimi ekstremalių sąlygų pasikartojimo pokyčiai.

Darbo aktualumas ir pritaikomumas

Šis darbas gali pasitarnauti sprendžiant dirvožemio drėgmės matavimų trūkumo problemą Lietuvoje. Nesant matavimų, nėra galimybės tiksliai įvertinti dirvožemio drėgmės rodiklių, o tai ypač aktualu ekstremalių meteorologinių sąlygų metu.

SWAP modelį, net ir turint ribotą tiesiogiai išmatuotų drėgmės duomenų kiekį, galima tinkamai sukalibruoti konkrečioms taškams ir gana tiksliai sumodeliuoti dirvožemio drėgmės reikšmes. Tai, kad modeliavimas gali būti atliktas minimizuojant įvesties duomenų kiekį, yra didelis privalumas, leidžiantis modeliavimo procesą perkelti į kitas tyrimų vietas.

Dirvožemio drėgmės rodiklių modeliavimas ekstremalių meteorologinių sąlygų metu parodė, kad modeliavimo rezultatai gali būti naudojami esamai būklei vertinti ir klimato tyrimams. Naudojant modeliavimo rezultatus ir atsižvelgiant į dirvožemio drėgmės sezoniškumą buvo išskirtos ekstremalios dirvožemio sąlygos, kurios ne visada sutampa su laikotarpiais, kada šios sąlygos identifikuotos pagal oficialius sausros ir ilgo lietingo laikotarpio indeksus. Todėl dirvožemio drėgmės modeliavimas gali būti taikomas ekstremalioms sąlygoms identifikuoti. Be to, atliktas tyrimas leidžia geriau suprasti dirvožemio drėgmę pagal oficialius kriterijus išskirtų sausrų ir ilgų lietingų laikotarpių metu, o tai, esant ekstremalioms sąlygoms, leistų papildyti taikomus indeksus drėgmės informacija.

Šiame tyrime pademonstruota, kad sukalibruoto SWAP modelio dirvožemio drėgmės vertės gali būti panaudojamos dirvožemio drėgmės pokyčiams praeityje, sąsajoms su meteorologiniais parametrais įvertinti ir nustatyti, kokios prieš tai buvusios oro temperatūros ir kritulių sąlygos lėmė ekstremalias dirvožemio drėgmės reikšmes. Tyrimo rezultatai rodo, kad modelis gali būti taikomas operatyviam dirvožemio būklės numatymui, kaip pradinis meteorologinius duomenis įvedant įvairios trukmės paros oro temperatūros ir kritulių kiekio prognozes, o modeliavimo rezultatai gali būti panaudojami ne tik žemės ūkyje, bet ir kitose srityje, kuriose svarbus drėgmės įvertinimas.

Dirvožemio drėgmės modeliavimas remiantis XXI amžiaus klimato kaitos scenarijais gali padėti priimti sprendimus, siekiant palengvinti ekstremalių reiškinių rizikos valdymą klimato kaitos kontekste. Modeliavimo rezultatai gali būti panaudojami parenkant prisitaikymo prie kintančio drėgmės režimo priemones tiek žemės ūkyje, tiek kitose srityse (pavyzdžiui, miškininkystėje, vandens taršos valdyje ir kt.).

Darbo struktūra

Šis darbas sudarytas iš tokių pagrindinių dalių:

1. **Mokslinių tyrimų dirvožemio drėgmės tematika apžvalga.** Analizuojant šaltinius atlikta literatūros apie dirvožemio drėgmės tipus, režimą ir svarbą aplinkai apžvalga. Literatūros analizės metu apžvelgti drėgmės matavimų būdai, drėgmės modeliavimo galimybės ir modeliavimo duomenų pritaikymas. Taip pat apibūdinta drėgmės matavimų situacija Lietuvoje išryškinant jų svarbą ekstremalioms sąlygoms identifikuoti ir vertinti.
2. **SWAP modelio kalibravimas ir validavimas.** Buvo atlikta modelio kalibravimui reikalingų pradinių išmatuotos dirvožemio drėgmės duomenų kokybės patikra. Vėliau buvo atliekamas SWAP modelio kalibravimas ir validavimas skirtingose Lietuvos meteorologijos stotyse, kuriose anksčiau buvo vykdomi dirvožemio drėgmės matavimai.
3. **Meteorologinių sąlygų 1951–2020 metais įvertinimas.** Naudojant kalibravimo metu nustatytus parametrus, SWAP modeliu sumodeliuota dirvožemio drėgmė 1951–2020 metais. Dirvožemio drėgmė analizuota vertinant gausių kritulių ir laikotarpių be kritulių poveikį dirvožemio drėgmei skirtingose granuliometrinės sudėties dirvožemiuose. Taip pat įvertinta dirvožemio drėgmės kaita sausrų pagal TPI30 ir ilgų lietingų laikotarpių metu bei išskirti sausi ir drėgni periodai dirvožemyje pagal sumodeliuotą dirvožemio drėgmę.
4. **Žemės ūkio augalų derlingumo ir ekstremalių drėgmės sąlygų sąsajos.** Išskirti sausi ir drėgni periodai dirvožemyje panaudoti vertinant grūdinių augalų (vasarinių ir žieminių javų) bei šakniavaisių (cukrinių runkelių ir bulvių) metinio derlingumo anomalijas 2000–2020 metais.
5. **SWAP modelių sumodeliuotos ir palydovais išmatuotos dirvožemio drėgmės palyginimas.** SWAP modelio dirvožemio drėgmė 0–5 cm sluoksnyje palyginta su dviem palydoviniais dirvožemio drėgmės produktais („Copernicus“ SSM 2017–2020 metais ir ESA CCI SM 1978–2020 metais) bei įvertintos palydovinės informacijos panaudojimo erdviniam dirvožemio tyrimams galimybės.
6. **Dirvožemio drėgmės pokyčiai iki XXI amžiaus pabaigos.** Pokyčių vertinimas buvo atliktas naudojant dviejų globalių klimato modelių išvesties duomenis pagal du klimato kaitos scenarijus. Pagal prognozuojamus rodiklius ir drėgmę įvertinti tiek vidutinių, tiek ekstremalių dirvožemio drėgmės sąlygų pokyčiai iki XXI amžiaus pabaigos.

Rezultatų aprobavimas

Disertacijos darbo rezultatai buvo pristatyti šešiose tarptautinėse ir vienoje nacionalinėje konferencijoje.

Tarptautinės konferencijos

1. **Mačiulytė, V.** (2018, kovo 20–23 d.). *Satellite soil moisture relationship with meteorological parameters*. Open Readings 2018, Vilnius.
2. **Mačiulytė, V.** (2018, birželio 11–15 d.). *Relationship between satellite measured soil moisture and meteorological parameters*. 2nd Baltic Earth Conference: The Baltic Sea Region in Transition, Helsingor.
3. **Mačiulytė, V.** (2019, kovo 19–22 d.). *Soil moisture and precipitation conditions in 2017*. Open Readings 2019, Vilnius.
4. **Mačiulytė, V.,** & Stankūnavičius, G. (2020, birželio 1–2 d.). *Agrothermal changes in 1961–2018 in Lithuania*. International 3rd Baltic Earth Conference: Earth system changes and Baltic Sea coasts, nuotolinė.
5. **Mačiulytė, V.,** & Rimkus, E. (2022, gegužės 30–birželio 3 d.). *Model-based soil moisture during droughts in Lithuania*. 4th Baltic Earth Conference: Earth system science for the Baltic sea region, Jastarnija.
6. Rimkus, E., Stonevičius, E., Valiukas, D., & **Mačiulytė, V.** (2022, gegužės 30–birželio 3 d.). *Definition of droughts and their recurrence in Lithuania*. 3rd Baltic Earth Conference: Earth system science for the Baltic sea region, Jastarnija.

Nacionalinė konferencija

Mačiulytė, V., & Stankūnavičius, G. (2020, gegužės 22 d.). *Terminių sezonų pokyčiai Vidurio Lietuvoje*. Klimato kaita Lietuvoje: globalūs ir nacionaliniai iššūkiai, stebėsena ir politikos gairės, nuotolinė, Lietuva.

Pagrindiniai darbo rezultatai buvo publikuoti keturiuose straipsniuose duomenų bazėje Clarivate Analytics Web of Science (CA WOS) ir konferencijų medžiagoje.

CA WOS

1. Dyrddal, A. V., Olsson, J., Médus, E., Arnbjerg-Nielsen, K., Post, P., Aņiskeviča, S., Thorndahl, S., Førland, E., Wern, L., **Mačiulytė, V.,** & Mäkelä, A. (2021). Observed changes in heavy daily precipitation over the Nordic-Baltic region. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 38, 100965. ISSN 2214-5818. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100965>
2. **Mačiulytė, V.,** Rimkus, E., Stonevičius, E., & Valiukas, D. (2022). Long-term precipitation events in the eastern part of the Baltic Sea region. *Oceanologia*,

65(1), 141–150. ISSN 0078-3234. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2022.02.003>

3. Olsson, J., Dyrddal, A. V., Médus, E., Södrling, J., Aņiskeviča, S., Arnbjerg-Nielsen, K., Førland, E., **Mačiulytė, V.**, Mäkelä, A., Post, P., Thorndahl, S. L., & Wern L. (2022). Sub-daily rainfall extremes in the Nordic–Baltic region. *Hydrology Research*, 53(6), 807–824. ISSN 0029-1277. <https://doi.org/10.2166/nh.2022.119>
4. Rimkus, E., **Mačiulytė, V.**, Stonevičius, E., & Valiukas, D. (2020). A revised agricultural drought index in Lithuania. *Agricultural and Food Science*, 29(4), 359–371. ISSN 1795-1895. <https://doi.org/10.23986/afsci.92150>

Konferencijų medžiaga

1. **Mačiulytė, V.** (2018). Relationship between satellite measured soil moisture and meteorological parameters. In *2nd Baltic Earth Conference "The Baltic Sea in Transition" Conference Proceedings*, 13, 159–160. ISSN 2198-4247. International Baltic Earth Secretariat Publication.
2. **Mačiulytė, V.**, & Rimkus, E. (2022). Model-based soil moisture during droughts in Lithuania. In *4th Baltic Earth Conference "Assessing the Baltic Sea Earth System" Conference Proceedings*, 21, 81–82. ISSN 2198-4247. International Baltic Earth Secretariat Publication.
3. **Mačiulytė, V.**, & Stankūnavičius, G. (2020). Agrothermal changes in 1961–2018 in Lithuania. In *3rd Baltic Earth Conference "Earth system changes and Baltic Sea coasts" Conference Proceedings*, 18, 72–73. ISSN 2198-4247. International Baltic Earth Secretariat Publication.
4. Rimkus, E., Stonevičius, E., Valiukas, D., & **Mačiulytė, V.** (2020). Definition of droughts and their recurrence in Lithuania. In *3rd Baltic Earth Conference "Earth system changes and Baltic Sea coasts" Conference Proceedings*, 18, 85–86. ISSN 2198-4247. International Baltic Earth Secretariat Publication.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1. Dirvožemio drėgmės samprata

Pagal *Tarptautinį hidrologijos žodyną* dirvožemio drėgmė (arba dirvožemio vanduo) apibrėžiama kaip drėgmė, esanti toje dirvožemio dalyje, kuri yra virš požeminio vandens viršutinės dalies, įskaitant vandens garus, esančius dirvožemio porose (WMO, 2012).

Dirvožemio drėgmė yra balanso tarp kritulių (teigiama dedamoji) ir oro temperatūros (neigiama dedamoji) bei infiltracijos (neigiama dedamoji) rezultatas. Išskiriant didesniai kritulių kiekiui ir esant žemesnei oro temperatūrai dirvožemio drėgmė auga, ir atvirkščiai. Tačiau drėgmės sąsajas su meteorologinėmis sąlygomis ir augalija gali būti sudėtinga nustatyti dėl inertiškumo (pavyzdžiui, 5 cm dirvožemio drėgmė daugiausia siejasi su prieš tai vieną dieną buvusiu kritulių kiekiu (Narendra, 2008), netiesinių ryšių ir įvairių veikiančių veiksnių gausos (Owe ir kt., 2001).

Nustatyta, kad krituliai daro reikšmingą poveikį paviršiaus dirvožemio drėgmei (0–10 cm), o oro temperatūra daugiausia veikia gilesnius sluoksnius (100–200 cm) (Cai ir kt., 2017). Paviršiaus dirvožemio drėgmė, kitaip nei šaknų zonos, labiau priklauso nuo atmosferos sąlygų (Zribi ir kt., 2010), dirvožemio tekstūros poveikis stiprėja didėjant gyliui ir einant laikui (Das ir kt., 2008).

Iškritusio kritulių kiekio poveikis drėgmės pokyčiams priklauso nuo dirvožemio infiltracinių savybių (Farrar ir kt., 1994), nuolydžio ir augalinės dangos (Zhang ir kt., 2010). Taip pat dirvožemio drėgmė bei jos pasiskirstymą veikia ir požeminis vanduo. Dirvožemio drėgmei požeminis vanduo suteikia sezoninę ar net tarpmetinę atmintį, dėl to net ir kritulių trūkumo periodu garavimas išlieka gan didelis (Martínez-de la Torre ir Miguez-Macho, 2019).

Upių nuotėkis taip pat priklauso nuo dirvožemio drėgmės. Jeigu prieš liūtį dirvožemio drėgmė yra mažesnė nei 34 %, tada nuotėkio pokytis yra mažas, bet jeigu daugiau nei 34 % – nuotėkis sustiprėja, nors didelę reikšmę turi ir kiti veiksniai (Uber ir kt., 2018). Tie veiksniai yra dirvožemio savybės ir būklė, augalijos ir kritulių sąveika bei žmogaus veikla, keičianti aplinką ir sukiantį hidrologinio funkcionavimo pokyčius, kurie viršija vidinį geosistemos atsparumą (Zehe ir Sivapalan, 2009). Todėl nėra iki galo aišku, kaip ekstremalūs krituliai paveikia nuotėkį esant prisotintam dirvožemiui (Uber ir kt., 2018).

Dirvožemio drėgmė ne tik yra nulemiama atmosferoje vykstančių procesų, pavyzdžiui, kritulių, tačiau ir grįžtamaisiais ryšiais gali daryti poveikį atmosferai. Nustatyta, kad tam tikru metu buvusių drėgmės anomalijų

poveikis gali išsilaikyti iki 3 mėnesių, tačiau dažniausiai apsiriboja poveikiu apatinei atmosferos daliai ir mažai veikia viršutinėje troposferoje vykstančius dinامينius procesus (Hong ir Pan, 2000). Ypač stiprus ryšys tarp dirvožemio drėgmės ir atmosferos cirkuliacijos gali susidaryti sausrų metu, kai sausumos–atmosferos sąveika sustiprėja (Cheng ir Chen, 2018). Dirvožemio drėgmė vasaros metu vaidina svarbų vaidmenį šilumos balanse, nes esant drėgnesniam dirvožemiui turbulentinis maišymasis yra silpnesnis, tačiau atmosferos nestabilumas (CAPE indeksas) – didesnis (Hong ir Pan, 2000).

Taip pat drėgmės pasiskirstymas gali būti susijęs su temperatūros ir kritulių ekstremumais (Jaeger ir Seneviratne, 2011) ar net žaibavimu (Kumar ir kt., 2016), todėl dirvožemio drėgmės įtraukimas į orų prognozavimo modelius gali pagerinti prognozės kokybę (van den Hurk ir kt., 2012).

Atmosferos cirkuliacija gali būti kaip jungtis, siejanti skirtingas teritorijas, kai vienoje didesnio masto teritorijoje drėgni (saus) dirvožemiai gali nulemti sausas (drėgnas) sąlygas kitose teritorijose (Dong ir kt., 2022). Ypač tai gali išryškėti vertinant drėgmės ir didelio masto atmosferos cirkuliacijos struktūrinius ryšius (Řehoř ir kt., 2021; Semenova, 2021).

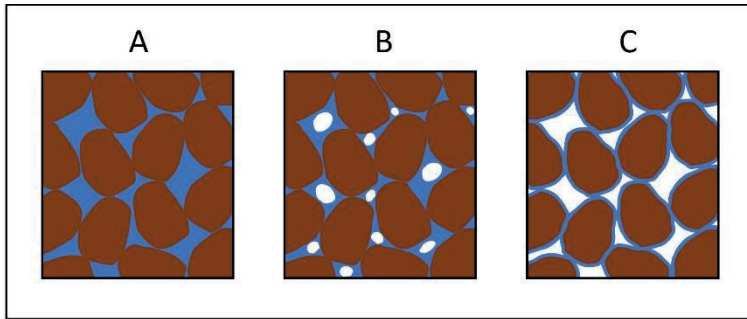
Dėl šių aptartų dirvožemio drėgmės sąveikų su aplinka ir atmosfera, drėgmė tampa svarbiu rodikliu, kurio įtraukimas į aplinkos procesų vertinimą ir tyrimus yra būtinas.

Dirvožemiai dažnai skaidomi pagal dirvodarinės uolienos granulimetrinę sudėtį, kuri nurodo santykį tarp smėlio (dalelės diametras siekia 2–0,05 mm), dulkių (0,002–0,005 mm) ir molio (< 0,002 mm) dalelių dirvožemyje. Dirvožemio tipas remiantis granulimetrine sudėtimi dažniausiai nustatomas pagal Fere granulimetrinės sudėties nustatymo grafinės išraiškos trikampį.

Drėgmę dirvožemyje gali sudaryti visų fazinių būsenų vanduo (skystosios, kietosios ir dujinės). Drėkinimo metu pripildžius visas dirvožemio poras bei vandeniu išstumiant orą yra pasiekiamas dirvožemio prisotinimas (1.1A pav.). Lengvesniuose dirvožemiuose, kaip smėliai ar priesmėliai, vandens sulaikymas dirvožemyje yra mažesnis nei sunkesniuose dirvožemiuose dėl didesnių oro tarpų (Costa ir kt., 2013). Bent kelias dienas trunkančios tokios prisotinimo sąlygos gali pakenkti augalams ir jie gali pradėti žūti, tačiau tokioms sąlygoms išsityti reikalingas nuolatinis drėkinimas (Taparauskienė ir kt., 2013). Nutrūkus krituliams, vanduo infiltruojasi, o infiltracijos greitis priklauso nuo dirvožemio struktūros ir granulimetrinės sudėties: smėlingesniuose dirvožemiuose greičiau, o molingesniuose – trunka ilgiau.

Būtent gravitacinis vanduo užpildo tarpus ir poras dirvožemyje ir jis infiltruojasi į žemesnius dirvožemio sluoksnius, pasiekdamas gruntinius vandenį (Navickas, 2008).

Slopstant ar visai sustojus drėkinimui, sustoja ir infiltracija. Tuomet didesnės dirvožemio poros lieka užpildytos oru, o mažesnės lieka užpildytos vandeniu: tokia dirvožemio drėgmės riba vadinama lauko drėgmės imlumu, arba talpa (1.1B pav.). Tai idealios sąlygos augalams augti, nes užtenka ir drėgmės ir oro augalams (Brouwer ir kt., 1985).



1.1 pav. Dirvožemio prisotinimo (A), pasiektos lauko drėgmės imlumo (talpos) (B) ir vytimo drėgmės (C) sąlygų schema. Ruda spalva pažymėtos dirvožemio dalelės, mėlyna – vanduo, o balta – oro tarpai (pagal Brouwer ir kt., 1985).

Vanduo iš dirvožemio pašalinama ne tik infiltracijos metu, bet ir dirvožemio paviršiaus drėgmės garavimo į atmosferą bei augalų drėgmės pasisavinimo metu. Ta drėgmė, kurią pasiima augalai, vadinama produktyviaja arba augalams pasiekiamą drėgme (dar kitaip – laisvąją ar kapiliarinę) (1.1B pav.). Būtent ši drėgmė yra pagrindinis augalų šaknų drėgmės šaltinis, nes ji stipriai nesąveikauja su dirvožemio dalelėmis ir šaknys gali ją lengvai pasisavinti (Navickas, 2008).

Dėl ilgesniam laikui nutrūkusio dirvožemio drėkinimo jis pradeda džiuoti. Kuo dirvožemis sausesnis, tuo augalams sunkiau esančią drėgmę pasisavinti, nes dirvožemio dalelių molekulių trauka stipriau sulauko vandens molekules, prikibusias prie jų, nei augalo šaknys geba atplėšti vandens molekules nuo dalelių. Ta riba, kai augalas jau nebegali pasisavinti drėgmės, nors jos vis dar yra, vadinama vytimo drėgme (dar kitaip – neproduktyviaja arba neprieinama drėgme) (1.1C pav.) (Brouwer ir kt., 1985; Stravinskas, 2008; Taparauskienė ir kt., 2013).

Augalams neprieinama dirvožemio drėgmė gali būti kelių tipų: higroskopinė drėgmė – 2-jų–3-jų vandens molekulių sluoksnelis ant dirvožemio dalelių paviršiaus; plėvelinė drėgmė – vandens sluoksnis, esantis virš higroskopinės drėgmės sluoksnio (taip pat sunkiai pasisavinama drėgmė)

(Navickas, 2008). 1.1C pav. šie du neprieinamos drėgmės tipai nėra atskirai pavaizduoti ir sujungti į vieną.

Vytimo drėgmės riba priklauso nuo dirvožemio granulimetrinės sudėties ir humuso kiekio. Smėlingesniuose dirvožemiuose vytimo drėgmės riba yra žemesnė (gali siekti 1,5 % drėgmės) nei molingesniuose (12–18 % drėgmės) (Navickas, 2008). Tai susiję su dirvožemių granulimetrine sudėtimi, nes molingesniuose dirvožemiuose yra daugiau smulkesnių dalelių, kartu jos turi didesnę paviršiaus plotą, todėl molekulinė trauka daugiau pritraukia augalams nepasiekiamos drėgmės aplink tas daleles.

Nėra vienodas ne tik skirtingų dirvožemių vytimo drėgmės slenkstis, tačiau gali skirtis ir augalų. Pavyzdžiui, kviečiai dirvožemio drėgmę gali pasisavinti esant sausesnei dirvai nei miežiai (Wiecheteck ir kt., 2020), todėl 1.1 lentelėje pavaizduota vytimo ir higroskopinė drėgmė yra orientacinė.

1.1 lentelė. Vytimo ir higroskopinė drėgmė (cm^3/cm^3) skirtingos granulimetrinės sudėties dirvožemiuose (pagal L. Taparauskienė ir kt. (2013)).

| Dirvožemis | Vytimo drėgmė | Higroskopinė drėgmė |
|------------------------------------|----------------------|----------------------------|
| Smėlis | 0,080 | 0,003 |
| Rišlus smėlis | 0,015 | 0,005 |
| Priesmėlis | 0,045 | 0,015 |
| Smėlingas sunkus priemolis | 0,143 | 0,048 |
| Vidutinio sunkumo priemolis | 0,106 | 0,035 |
| Smėlingas molis | 0,204 | 0,068 |
| Dulkiškas lengvas priemolis | 0,098 | 0,033 |
| Dulkiškas | 0,075 | 0,025 |
| Sunkus priemolis | 0,174 | 0,055 |
| Dulkiškas sunkus priemolis | 0,166 | 0,055 |
| Dulkiškas molis | 0,204 | 0,068 |
| Molis | 0,234 | 0,078 |

Produktyvioji drėgmė yra ta, kuri viršija vytimo drėgmę ir apskaičiuojama kaip bendros drėgmės, išmatuotos dirvožemyje, ir vytimo drėgmės, nustatytos laboratorijoje, skirtumas. Nevienoda granulimetrinė sudėtis nulemia vytimo ir produktyviosios drėgmės kieki. Kuo dirvožemis yra sunkesnis ir jame yra didesnis procentas molio dalelių, tuo vytimo (neproduktyviosios) drėgmės kiekio riba yra aukštesnė (1.1 lentelė), tačiau kartu sunkesni dirvožemiai yra drėgnesni nei lengvesni. Teigiama, kad sausą vasarą augalams augti geriausias dirvožemis sudarytas iš 0,5–2 mm skersmens dalelių, o drėgną – 1–5 mm. Tankios ir drėgnos dirvos ne tik pasižymi didele šilumos talpa, bet ir dideliu šilumos laidžiu (Bogužas ir kt., 2013). Įprastesnėmis sąlygomis geriausias

dirvožemis augalams augti yra sudarytas iš 0,5–1 mm skersmens dalelių (trupininė struktūra), kadangi tokia dirvožemyje lieka pakankamai oro tarpų, svarbių dirvožemio drėgmei, oro balansui palaikyti ir augalų šaknų aprūpinimo deguonimi užtikrinti (Sakalauskas ir kt., 2012).

Tokių pavojingų reiškinių, kaip sausros ar potvyniai, dažnio ir intensyvumo poveikis gali būti nevienodas smėlingesniems ir sunkesniems molio dirvožemiams (Trnka ir kt., 2014). Smulkesnė dirvožemio frakcija lemia ilgiau trunkančią vandens infiltraciją į dirvožemį. Infiltracijos greitis svarbus tuo, kad apibūdina dirvožemio atsparumą vandeniui, nes didelis atsparumas (mažas prasiskverbimas) padidina paviršiaus nuotėkį, todėl ir padidėja dirvožemio erozija bei sumažėja maistinių medžiagų judėjimas dirvožemyje (Pereira ir Novara, 2014).

Dirvožemio drėgmė itin svarbi žemės ūkiui ir augalams. Dirvožemio drėgmė yra kaip tarpininkas, nes kritulių kiekis augalo našumą ir biomasę veikia per dirvožemio drėgmę (Didiano ir kt., 2016). Vanduo augale perneša ir paskirsto mikroelementus, dalyvauja fotosintezės ir temperatūros reguliavimo procesuose bei daro didelę įtaką augalų fiziniams savybėms (Butkevičienė, 2018). Tinkamas drėgmės kiekis augalams yra ypač svarbus, nes vandens trūkumas sukelia šių procesų sutrikimų.

Augalams svarbesnė drėgmė, esanti šaknų zonoje nei paviršiuje (Zribi ir kt., 2010). Šaknų zona nėra stacionari ir priklauso nuo pačios augalijos. Pavyzdžiui, krūmų šaknų zona gali siekti 20–50 cm, o žolės – 5–20 cm. Šaknų zona gali siekti iki 100 cm (Wang ir kt., 2007), nors ir gilesnių sluoksnių drėgmė gali būti svarbi, ypač medžiams (Hogg ir kt., 2013).

Šiltuoju sezonu atskirų laikotarpių dirvožemio drėgmė gali būti panaudojama augalijos sąlygų prognozėms (Adegoke ir Carleton, 2002). Kadangi augalijos būklė ir dirvožemio drėgmė pasižymi statistiškai reikšmingais ryšiais, dirvožemio drėgmė gali būti naudojama netiesiogiai vertinant augalijos būklę (Wang ir kt., 2007).

Priklausomai nuo tyrimo metodikos ir naudojamų duomenų, dirvožemio drėgmės ir augalijos būklės ryšiai gali pasižymėti inercija, siekiančia 8 savaites (Adegoke ir Carleton, 2002), 1 mėnesį (Chen ir kt., 2014) ar 5–10 dienų (Schnur ir kt., 2010). Taip pat gali būti skirtumai ir tarp regionų: 10 dienų inercija būdinga drėgniems regionams, po 5 dienas ar mažiau – sausiems (Wang ir kt., 2007). Kai kuriais atvejais augalijos būklei svarbus ne tik mėnesio kritulių kiekis, bet ir iškritęs per ilgesnį laikotarpį (Méndez-Barroso ir kt., 2009). Tokia augalijos būklės pokyčių inertiška reakcija į drėgmės pokyčius gali būti panaudojama augalijos būklės pokyčiams prognozuoti (Adegoke ir Carleton, 2002; Zribi ir kt., 2010).

Augalijai dirvožemio būseną nėra palanki tiek pasiekus prisotinimo sąlygas, tiek vytimo drėgmės sąlygas.

Sausrų metu dirvožemio drėgmė, kritulių kiekis sumažėja, o augalijos būklė prastėja (Orth ir kt., 2016). Drėgmės trūkumo (sausros) metu slopinama fotosintezė (Holsten ir kt., 2009), ribojamas produktyvumas, kuris vėlesniais augalo augimo ir vystymosi tarpsniais nebegali būti kompensuotas (Pileckaitė, 2012), ypač jeigu sausra pažeidė augalo dauginimosi organus vegetatyvinėje fazėje (Daryanto ir kt., 2017).

Drėgmės trūkumo metu augalų lapų temperatūra yra aukštesnė ne tik dėl dažnai sausros metu vyraujančių šiltesnių orų, bet ir dėl sutrikusios augalo evapotranspiracijos, todėl augalas veikiamas ne tik drėgmės trūkumo, bet dar ir šiluminio streso (Marchin ir kt., 2020). Sausos ir karštos sąlygos kartu daro stipresnį neigiamą poveikį augalams, ypač ir jų reprodukciniame etape (Cohen ir kt., 2021).

Augalai gali būti jautresni sausrai reprodukciniame etape (grūdų prisipildymo ir gumbų atsiradimo) nei vegetatyviniame etape (išskyrus kviečius, kurie jautrūs abiejų fazių metu) (Daryanto ir kt., 2016). Taip pat augalų jautrumas sausros sąlygoms gali būti skirtingas, pavyzdžiui, javai gali būti atsparesni sausrai nei ankštiniai ar šakniniai (gumbiniai) augalai (Daryanto ir kt., 2016). Gebėjimas toleruoti didelius karščius gali priklausyti nuo veislės (Tack ir kt., 2015), o piktžolės, kurios gali būti labiau prisitaikiusios išverti sausrą, sausros metu gali sudaryti papildomą konkurenciją žemės ūkio augalams (Chadha ir kt., 2019).

Medžiai turi stipresnę ilgų sausrų toleranciją (Detto ir kt., 2006). Tačiau paskutiniame etape dažnėjančios ilgalaikės net kelerius metus trunkančios sausros (Hari ir kt., 2020; Moravec ir kt., 2021), kurios turėtų dažnėti ir ateityje, gali paveikti ir miško ekosistemas, gana atsparias vienmetėms sausroms (Moravec ir kt., 2021).

Kaip sausos, taip ir per drėgnos sąlygos gali daryti neigiamą poveikį augalams. Tačiau moksliniuose tyrimuose sausrai skiriama daugiau dėmesio tikriausiai dėl to, kad įprastai ji apima didesnę teritoriją. Užmirkimai dažniau gali būti nulemti gana lokalių ekstremalių kritulių sąlygų, todėl jiems analizuoti ir identifikuoti skiriama mažiau dėmesio.

Dirvožemio drėgmė susijusi su deguonies apykaita dirvožemyje, anglies prietakos į dirvožemį kontrole (Chen ir kt., 2014; Engstrom ir kt., 2008), azoto oksido dujų gamyba ir kitomis cheminėmis reakcijomis (Venterea ir kt., 2005). Užmirkimas gali nulemti deguonies ir maistinių medžiagų dirvožemyje, svarbių augalams, trūkumą (Akhtar ir Nazir, 2013), dėl ko gali prasidėti įvairių augalo morfologinių struktūrų pokyčių (Pan ir kt., 2021). Dėl to sumažėja auginamų augalų biomasė, grūdų derlius, palyginti su

neužmirkusiais augalais. Tačiau jeigu tuos pačius augalus paveikia keli ekstremalūs reiškiniai, pavyzdžiui, ankstyvesnėje augalo augimo fazėje užmirkimas, o vėliau – sausra, tai gali padaryti dar didesnę poveikį augalų būklei ir galutiniam derliui (Farkas ir kt., 2020). Be to, poveikis priklauso nuo šių reiškinų laiko augimo fazės atžvilgiu ir dėl užmirkimo žiemą pasėliai ir derlius gali labiau nukentėti nei dėl sausros pavasarį (Cannell ir kt., 1984). Ekstremaliai drėgnos sąlygos vegetacijos sezono pradžioje gali nulemti iki 50 % kukurūzų plotų praradimus (Huang ir kt., 2022), 39 % mažesnę bulvių derlių (Sawicka ir kt., 2022). Vertinama, kad bendrai globaliu mastu užmirkimas daro apie 33 % žalą, palyginti su sąlygomis be jo (Tian ir kt., 2021). Vokietijoje atlikto tyrimo metu nustatyta, kad visgi sausros daro daugiau žalos derliui nei užmirkimai: viena sausros diena žieminių kviečių derlių gali sumažinti 0,36 %, miežių – 0,48 %, o viena užmirkimo diena – žieminių kviečių 0,23–0,28 %, miežių – 0,24–0,40 %, priklausomai nuo vegetatyvinės augalo fazės tuo metu (Schmitt ir kt., 2022).

Užmirkimo poveikio augalams stiprumas priklauso ir nuo augalo tipo, augimo fazės (pavyzdžiui, miežiai ir rapsai gali būti mažiau paveikiami užmirkimo nei kviečiai (Ploschuk ir kt., 2018) tiek ankstyvesnėje, tiek vėlyvesnėje fazėse), poveikio trukmės (Ploschuk ir kt., 2018; Tian ir kt., 2021) ar net augalo genotipo (Arduini ir kt., 2016). Tyrinėjant, kaip įvairiose augalo fazėse fiksuotas skirtingos trukmės užmirkimas paveikia augalų būklę, nustatyta, kad ankstesnėse augalo fazėse (pavyzdžiui, vegetatyvinėje) fiziologinis poveikis augalui gali prasidėti ir po 2–6 dienų nuo užmirkimo pradžios, o vėlesnėse – fiziologiniai pokyčiai tampa ryškesni trunkant reiškiniui ilgiau (Huang ir kt., 2022). Tačiau dėl reprodukcinės fazės metu padarytos užmirkimo žalos derlius gali sumažėti daugiau nei vegetatyvinės fazės metu (Tian ir kt., 2021). Net ir 3 dienų trukmės užmirkimai gali turėti ilgalaikį poveikį kviečiams dėl šaknų sistemos pokyčių (Malik ir kt., 2002). Kai kuriuose tyrimuose nustatytas ženklus poveikis augalui po 20 dienų užmirkimo (Arduini ir kt., 2016), bet daugiausia didžiausias poveikis įvairiuose pasaulio regionuose nustatomas užmirkimui trunkant bent 15 dienų (Tian ir kt., 2021).

Dirvožemio drėgmė augaliją veikia ne tik tiesiogiai, kaip drėgmės kiekį augale užtikrinantis faktorius, tačiau ir netiesiogiai. Sausesnis dirvožemis, ypač aridiniame klimato, gali būti veikiamas vėjo, o liūčių periodu – vandens erozijos, o tai gali nulemti mažėjantį augalų atsparumą (Pierre ir kt., 2012). Taip pat dirvožemio drėgmė yra svarbi ir dirvožemio įdirbimo kokybei bei žemės ūkio technikos darbui, ypač kai dirvožemis drėgnesnis, todėl būna netrūpantis ir lipnus (Sakalauskas ir kt., 2012). Perteklinis drėgnumas ir didelė teigiama dirvožemio drėgmės anomalija (Copernicus Climate..., 2022) gali

neleisti nuimti derliaus vasaros pabaigoje ar rudenį ir atlikti kitų darbų prieš žiemą, kaip kad nutiko 2017 metais dalyje Šiaurės ir Šiaurės rytų Europos (European Union, 2017; European Union, 2018; JRC, 2017a; JRC, 2017b). Taip ekstremalios vieną sezoną ar jo dalį buvusios meteorologinės sąlygos gali pakenkti ir kitų metų derliui.

Estijoje atlikto tyrimo metu nustatyta, kad, iškritus daugiau nei 10 mm kritulių per parą, viršutinis 25 cm dirvožemio sluoksnius gali pasiekti plastiškumo ribą sunkesniuose dirvožemiuose (Reintam ir kt., 2016). Plastiškumo riba – drėgmės kiekis, kurį pasiekus dirvožemio būseną pasikeičia iš kietosios į plastiškąją (Žurinskas, 2019). Ši riba priklauso ne tik nuo dirvožemio granulimetrinės sudėties, bet ir nuo organinės medžiagos kiekio (Soane ir kt., 1972). Plastiškumo riba siejama su galimybe lauke naudoti transporto priemones, nes ją pasiekus dirvožemis gali prarasti savo struktūrą pasikeičiant jo suspaudimui, todėl gali pablogėti dirvos pravažumas. Nustatyta, kad iškritus daugiau nei 10 mm lietaus viršutiniuose dirvožemio sluoksniuose per 2–3 val. dirvožemio drėgmė padidėjo 1–2,5 %, o po 2–3 dienų drėgmė grįžo į pradinę būseną kaip prieš kritulius. Likęs vanduo buvo sunaudotas ir išgarintas augalų arba išgaravo iš dirvožemio (Reintam ir kt., 2016).

Net ir užtikrinus tinkamą augalams dirvožemio drėgmę išlieka ir kiti reikšmingi faktoriai, galintys nulemti augalijos būklės prastėjimą. Kompleksinis aplinkos sąlygų poveikis yra ypač ryškus tokiuose regionuose kaip Šiaurės Europa, kur vyrauja atšiaurios žiemos, trumpas vegetacijos periodas, ilga dienos trukmė vasarą, šalnų rizika pavasarį ir rudenį, sausrų sezono pradžioje ir lietingų periodų nuimant derlių rizika (Mukula ir Rantanen, 1987; Peltonen-Sainio ir kt., 2009). Drėgmės trūkumo poveikis gali būti netgi ne toks reikšmingas, nes jis turi trukti ilgesnį laiką. Įvairių sąlygų poveikis augalui ir jo jautrumas priklauso nuo augalo rūšies (Méndez-Barroso ir kt., 2009) ir jo vystymosi tarpsnio (Butkevičienė, 2018). Pavyzdžiui, didžiausias aplinkos poveikis grūdinių augalų produkcijai yra žydėjimo metu, kai besiformuojantys grūdai gali sumažėti ar būti sunaikinti (Barlow ir kt., 2015). Taip pat neigiamas poveikis itin stiprus formuojantis grūdams. Ekstremalios oro temperatūros poveikis žiedų apdulkinimo metu kukurūzų derlių gali sumažinti net iki 80–90 % (Hatfield ir Prueger, 2015; Stratonovitch ir Semenov, 2015). Javai bei kukurūzai gali nukentėti ne tik nuo šalnų pavasarį, tačiau ir nuo sausrų ir aukštos temperatūros vasarą (Supit ir kt., 2012), žieminiams javams pavojingos šalnų rudenį ir ekstremalūs karščiai pavasarį (Tack ir kt., 2015), o visoje Europoje auginamos kviečių veislės neigiamai reaguoja į sauringas sąlygas po sėjos arba į žiemos šalčius (-15, -20 °C) (Mäkinen ir kt., 2018).

Šiltesnės nei įprastai vegetacijos sezono sąlygos su pakankamu kritulių kiekiu yra palankios javams Lietuvoje, tačiau dar labiau šylant klimatui teigiamas poveikis mažėtų, o sumažėjęs kritulių kiekis gali nulemti neigiamą poveikį derlingumui ne tik Lietuvoje (Povilaitis ir kt., 2009), bet ir kitose Europos šalyse (Pirttioja ir kt., 2015). Vis dėlto kylančios vidutinės oro temperatūros poveikis augalams pavasarį gali būti iš dalies kompensuojamas didėjančiu kritulių kiekiu (Tack ir kt., 2015). Numatoma, kad klimato kaita neigiamai paveiks kviečių produkciją daugumoje pasaulio regionų (Porter ir kt., 2014; Tack ir kt., 2015). Dėl klimato kaitos, ekstremaliai aukštos temperatūros ir kritulių atvejų daugėja, todėl tai gali sumažinti žemės ūkiui skirtus plotus (Powell ir Reinhard, 2016). Didėjantis klimato ekstremalumas, o kartu ir augantis sausrų ir užmirkimų kiekis, gali nulemti sudėtingesnes sąlygas augalams ir dėl to dar iki 2030 metų derliaus praradimo rizikos tikimybė gali išaugti 4,5 karto, o iki 2050 – iki 25 kartų globaliu mastu (Caparas ir kt., 2021). Sumažėjus dirvožemio drėgmei dirbtinio drėkinimo poreikis gali išaugti dvigubai ar trigubai (Chen ir kt., 2011). Pagal pesimistiškiausią klimato kaitos scenarijų (RCP8.5) 60 % dabar auginamų kviečių plotų XXI amžiaus pabaigoje bus veikiami vandens trūkumo, kai šiuo metu tai siekia 15 % (Trnka ir kt., 2019), o iš eilės einančių sausrų skaičius antroje amžiaus pusėje gali padidėti iki 7 kartų lemiant papildomą poveikį 40 mln. hektarų dirbamų žemės plotų (Hari ir kt., 2020).

Tyrimai rodo, kad augalai evoliuciškai gali prisitaikyti ar būti selekciniu būdu pritaikomi prie besikeičiančių klimato sąlygų ir sausrų dažnėjimo (Dickman ir kt., 2019; Rauschkolb ir kt., 2022; Snowdon ir kt., 2021), todėl ir prisitaikymo prie klimato kaitos priemonės yra būtinos.

1.2. Dirvožemio drėgmės matavimai

Dirvožemio drėgmės matavimai yra svarbūs vertinant vandens kiekį dirvožemyje. Dirvožemyje esanti drėgmė gali būti išreiškiamą įvairiai: vandens tūriu dirvožemio tūryje, užimamo vandens tūrio procentu nuo bendro oro tarpų (poringumo) tūrio dirvožemyje ir panašiai. Dirvožemio drėgmės išraiška priklauso nuo matavimo tikslo ir metodo.

Anksčiau, kol dar nebuvo sukurta dirvožemio drėgmės matavimo prietaisų, ūkininkai rankomis pajausdavo arba vizualiai įvertindavo, kokia yra apytikslė dirvožemio drėgmė, tačiau atsiradus moksliniams metodams ir tobulėjant technologijoms buvo pradėti instrumentiniai drėgmės matavimai (Kaur ir kt., 2016). Šiuo metu yra įvairių skirtingais principais veikiančių drėgmės

matavimų metodų (Carlaw, 2000; Narasimhan ir kt., 2005; Taparauskienė ir kt., 2013):

1. *Gravimetrinis metodas* – tai vienintelis metodas, kuris dirvožemio drėgmę matuoja tiesiogiai, kai paimti dirvožemio pavyzdžiai sveriami prieš ir po dirvožemio išdžiovinimo. Taip iš svorio pokyčio išskaičiuojamas vandens kiekis. Šis metodas yra laboratorinis ir gana nesudėtingas, bet mėginys negali būti paimtas iš to paties taško antrą kartą (Carlaw, 2000; Dorigo ir kt., 2011). Atskirais atvejais gali būti sunku paimti mėginį iš uolingų dirvožemių ir tenka daugiau darbo laboratorijoje, todėl nėra operatyvus (Kaur ir kt., 2016).
2. *Neutronų drėgmės matuokliai* (zondai) nustato drėgmę naudojant radioaktyvųjį elementą (američį). Zondas skleidžia greituosius neutronus, o jutiklis priima po kontakto su dirvožemiu grįžusiuosius. Neutronai, kontaktuodami su vandenilio atomu, praranda energiją, lėtėja ir dalis negrįžta, o sugrįžusių skaičius išmatuojamas. Jutiklyje naudojamos boro trifluorido dujos. Dujos skleidžia fotonus, kai jos sugeria neutronus, todėl grįžtančių neutronų skaičių galima apskaičiuoti (Kaur ir kt., 2016).
3. *Laiko trukmės reflektometrija* – metodas, atsiradęs 1980 metais. Tinka daugeliui dirvožemių tipų ir gali pakeisti gravimetrinį matavimo metodą, nes reikia mažiau laiko sąnaudų. Be to, šis matavimo metodas yra mažiau invazinis (Brocca ir kt., 2017). Yra matuojamas elektrinis impulsas tarp dviejų jutiklių dirvožemyje, o vandens kiekis apskaičiuojamas pagal elektrinio signalo sklidimo laiką tarp jų (Kaur ir kt., 2016). Metodas tiksliai išmatuoja drėgmę ir nereikia dažnai kalibruoti, tačiau sistema yra brangi (Kaur ir kt., 2016).
4. *Dažnio reflektometrija* naudoja bent 2 talpos jutiklius (gipso blokus), kuriais išmatuojama aplinkos dielektrinė konstanta, priklausanti nuo drėgnumo: kuo daugiau vandens, tuo terpės konstanta yra didesnė. Elektrodai sukuria elektrinę įtampą dirvožemyje, dėl vandens pasikeitęs dirvožemio laidumas nulemia dažnio svyravimus, o rezonanso reikšmė naudojama vandens kiekiui išmatuoti. Tai yra nebrangus metodas ir tikslesnis nei laiko trukmės reflektometrija (Kaur ir kt., 2016), todėl vienas dažniausiai taikomų dirvožemio drėgmės matavimuose (Narasimhan ir kt., 2005; Taparauskienė ir kt., 2013).
5. *Tensiometrai* naudojami vandens įtempiui dirvožemyje nustatyti. Prietaisas sudarytas iš vandeniui užpildyto dažniausiai plastikinio vamzdelio su porėtu keramikiniu antgaliu. Vamzdelio viršuje yra vakuomo jutiklis. Keramikinis antgalis veikia kaip membrana, pro kurią teka vanduo. Dirvožemyje vanduo teka iš vamzdelio, kol pasiekiamas

pusiausvyra. Vamzdelio viršuje susidaro vakuumas, kuris fiksuojamas vakuomo jutikliu. Jei aplinka pasipildo vandeniu, vandens lygis vamzdelyje pradeda augti. Šie matuokliai yra pigūs ir gerai veikia drėgnoje dirvoje. Tai nebrangi ir gana paprasta sistema, tačiau reakcijos laikas į drėgmės pokyčius aplinkoje gali būti gana lėtas. Be to, įrangą reikia nuolatos prižiūrėti (Kaur ir kt., 2016; Narasimhan ir kt., 2005; Taparuskienė ir kt., 2013).

6. *Granulinis matricos blokas* – tai bene vienas seniausių jutiklių, naudojamų dirvožemio drėgmei nustatyti. Į žemę įmontuojami standartiniai gipsiniai porėti blokai. Šiame bloke esančio elektrodo varža yra proporcinga bloke esančio vandens kiekiui, todėl kuo daugiau drėgmės bloke, tuo varža mažesnė (Taparuskienė ir kt., 2013). Nors šie jutikliai paprasti ir nebrangūs, tačiau su laiku gipsas pradeda tirpti. Taip pat esant sausoms sąlygoms gali nebefiksuoti drėgmės pokyčių arba nesureaguoti į iškritusius kritulius (Nacionalinė mokėjimo..., 2018; Taparuskienė ir kt., 2013). Tokiu veikimo pagrindu veikė *Watermark* jutiklių tinklas Lietuvoje 2009–2020 metais.

Pagrindinis visų taškinių matavimų trūkumas yra tas, kad jie matuoja viename taške, o dirvožemio drėgmė yra labai nehomogeniška laiko ir erdvės atžvilgiu. Daugiausia dirvožemio drėgmė priklauso nuo kritulių kiekio ir jų režimo. Krituliai tiesiogiai veikia dirvožemio drėgmę, tačiau drėgmės reakcija priklauso nuo iškritusio kritulių kiekio, trukmės ir analizuojamo dirvožemio sluoksnio gylio (Yu ir kt., 2015). Nustatyta, kad drėgmė gali kisti ir labai nedideliuose plotuose, o jos pokyčiai gali būti siejami su augalų rūšių pasiskirstymu erdvėje (Chen ir kt., 2015; Roux ir kt., 2013). Pavyzdžiui, miškingose teritorijose dirvožemio drėgmės variacija, nulemta kritulių, yra santykinai mažesnė nei pievose ar krūmynuose (Yu ir kt., 2015).

Dirvožemio drėgmę veikia kritulių kiekio nehomogeniškumas ir kartu labai įvairus dirvožemio savybių pasiskirstymas tiek horizontaliai, tiek vertikaliame dirvožemio profilyje. Kita vertus, dirvožemio drėgmė nėra toks kaitus rodiklis kaip krituliai. Tačiau abiejų rodiklių matavimai yra gana komplikuoti, todėl teritoriniam vertinimui reikalingas tankus stebėjimų tinklas. 2017 metais L. Broccos su kolegomis atliktame tyrime teigiama, kad dirvožemio drėgmės matavimų tinklas yra gerokai retesnis nei kritulių kiekio. Tik Europoje bei JAV yra pakankamai didelis dirvožemio drėgmės stočių skaičius, o kitur dirvožemio drėgmės matavimų praktiškai nėra (Brocca ir kt., 2017).

Atsiradę nuotoliniai matavimai leidžia dirvožemio drėgmės vertinimą perkelti iš taškinio į erdvinį mastą, o palydoviniai matavimai yra metodas, labiausiai tinkantis situacijai didelėje teritorijoje vertinti (Brocca ir kt., 2017).

Palydovuose įmontuoti dirvožemio drėgmės jutikliai yra paremti įvairiais matavimo principais, tačiau pagrindinis skirtumas tarp įvairių jutiklių yra matuojamų bangų ilgis (Walker, 1999). Išsamiai prieinamus palydovinius drėgmės produktus, išmatuotus įvairiais sensoriais, apžvelgė L. Brocca ir kt. (2017), J. Liu ir Y. Yang (2022) bei J. Peng ir kt. (2021).

Dažniausiai dirvožemio drėgmė nustatoma aktyviaisiais arba pasyviaisiais mikrobangų radiometrais (Brocca ir kt., 2017):

1. *Aktyvieji mikrobangų radiometrai* siunčia signalą į žemės paviršių ir fiksuoja jį grįžtantį (Peng ir kt., 2021). Aktyvieji radiometrai skirstomi į sintetinės apertūros radarus (SAR, angl. *Synthetic Aperture Radar*), kurie pasižymi aukšta skiriamąja geba (< 1 km), tačiau dideliu laiko žingsniu (> 10 dienų), ir skaterometrus (angl. *scatterometer*), kurie pasižymi blogesne skiriamąja geba (~ 20 km), bet mažu laiko žingsniu (~ 1 diena) (Brocca ir kt., 2017). Aktyvieji radiometrai yra ne tokie jautrūs atmosferos sąlygoms nei pasyvieji.
2. *Pasyvieji mikrobangų radiometrai* fiksuoja nuo žemės paviršiaus atsklindantį mikrobangų signalą (Peng ir kt., 2021). Jie pasižymi ne itin didele skiriamąja geba (~ 20 km), bet mažu laiko žingsniu (~ 1 diena).

Kadangi skirtingi jutikliai pasižymi nevienoda erdvine skiriamąja geba ir laiko žingsniu, palydovo duomenų laiko žingsnis gali būti pagerintas naudojant kelių tokių pačių jutiklių skirtinguose palydovuose duomenis arba kelių skirtingų tipų jutiklių duomenis (Brocca ir kt., 2016; Liu ir kt., 2011).

Palydovinių duomenų privalumai daugiausia susiję su didele erdvine aprėptimi ir santykinai maža dideles apimties erdvinių tyrimų kaina (Brocca ir kt., 2017; Jian ir kt., 2009). Globalūs produktai leidžia paprasčiau, patogiau ir pigiau gauti bei apdoroti duomenis, o kai kurių produktų ilgos sekos, siekiančios dešimtis metų, suteikia galimybes atlikti išsamesnius ir plataus masto tyrimus. Taip pat palydoviniai duomenys gali būti panaudojami ir kalibruojant paviršiaus modelius (Pinnington ir kt., 2018).

Tačiau kartu su šiais privalumais iškyla ir daug papildomų problemų apdorojant ir interpretuojant palydovinius duomenis. Viena iš problemų yra susijusi su tuo, jog dirvožemio drėgmė nustatoma tik paviršiniame 2–7 cm dirvožemio sluoksnyje (Brocca ir kt., 2017). Apie 5 cm storio viršutinis sluoksnis laikomas kaip maksimaliai galimas įvertinti palydovais (Kasim ir kt., 2020). Taip pat dauguma palydovinių drėgmės produktų pasižymi prasta skiriamąja geba bei labai žema kokybe nustatant dirvožemio drėgmę tam tikrose paviršiaus sąlygose, pavyzdžiui, kur tanki augalija (Brocca ir kt., 2017). Tai susiję su tuo, kad jutiklių jautrumas gali priklausyti nuo augalijos biomasės sezoniskumo ir aukščio (Jones ir kt., 2009; Wen ir kt., 2005). Teigiama, kad kai augalija yra tankesnė (augalijos būklės indeksas

NDVI > 0,45), SAR atspindį gali matuoti ne nuo žemės paviršiaus, o nuo augalijos (Wang ir kt., 2004), ir tai gali priklausyti nuo naudojamų bangų dažnio ir ilgio. Todėl tai, kartu su prasta skiriamąja geba, riboja palydovinių dirvožemio drėgmės duomenų panaudojimą žemės ūkio tikslams. Vis dėlto, klimatologiniams tyrimams mažesnės skiriamosios gebos duomenys gali būti tinkamesni nei didesnės, nes kai detalumas mažesnis, gali būti mažiau erdvinių matavimo klaidų (Adegoke ir Carleton, 2002).

Palydovinių duomenų tikslumo, palyginti su *in situ* išmatuotais duomenimis, trūkumą (Brocca ir kt., 2017) galima eliminuoti ar bent jau minimizuoti taikant skiriamosios gebos didinimo metodus (Piles ir kt., 2014). Taip pat galima jungti aktyviųjų ir pasyviųjų jutiklių duomenis, sukuriant dažnesniais stebėjimais pasižyminčias ilgalaikes duomenų sekas (Liu ir kt., 2011; Liu ir kt., 2012; Wagner ir kt., 2012). Tačiau skirtingų jutiklių informacijos jungimas kelia nemažai iššūkių, nes jutikliai skiriasi savo dažniais, poliarizacija ir panašiai, todėl nuolatos yra vykdomi tyrimai ieškant geriausių duomenų jungimo ir lūžių tarp skirtingų duomenų šaltinių minimizavimo algoritmų (Preimesberger ir kt., 2021).

Nuotoliniai stebėjimai tinkamiausi naudoti kaip antžeminių duomenų skiriamosios gebos didinimo įrankis, o ne kaip išsamių ir tikslių duomenų rinkinys (Glenn ir kt., 2008). Tačiau ten, kur matavimų tinklo nėra arba jis yra retas, palydoviniai matavimai gali suteikti svarbią informaciją apie paviršiaus drėgmės sąlygas.

1.3. Dirvožemio drėgmės modeliavimas

Dirvožemio drėgmės modeliavimas gali būti įrankis, padedantis įvertinti vandens kiekio dirvožemyje kaitą. Jis gali būti atliekamas siekiant kelių tikslų.

Tam tikruose taškuose sukalibruotas modelis gali būti naudojamas ten, kur matavimų nėra arba yra reti. Ispanijoje nustatyta, kad koreliacinis ryšys r tarp SWAP modelio ir išmatuotų dirvožemio drėgmės reikšmių siekia 0,878 ir 0,025 RMSE (m^3/m^3) ir modelis gali būti taikomas dirvožemio drėgmei modeliuoti kitose Ispanijos vietose, pavyzdžiui, kur dirvožemio drėgmė vidutiniškai yra mažesnė (Wanders ir kt., 2012). Svarbu, kad sezoninė dirvožemio drėgmės kaita būtų gerai atspindima modelio išvestyje, nes tuomet paviršinės ribinės sąlygos gali būti perkeliamos ir į šaknų zoną (Joris ir Feyen, 2003), o stiprus modelio (SWAP) ir išmatuotos drėgmės ryšys gali siekti 50 cm gylį (Das ir kt., 2008). Modeliuota dirvožemio drėgmė ar jos deficitas gali būti geresnis sausrų identifikavimo įrankis nei tokie sausrų identifikavimo

indeksai kaip standartizuotas kritulių indeksas SPI, kuris neatsižvelgia į skirtingų augalų kritulių poreikį, o modelis tai gali padaryti (Narendra, 2008).

Taip pat modeliavimas gali būti taikomas siekiant validuoti palydovinius matavimus. Ispanijoje nustatyta, kad sukalibruoto SWAP modelio ir drėgmės, nustatytos iš palydovo (AMSR-E ir ASCAT jutikliais), koreliaciniai ryšiai geriausiu atveju siekia 0,68–0,71. Tačiau rezultatas gali siekti ir vos 0,42 (SMOS jutiklis). Ypač svarbu, kaip palydovu nustatyta drėgmė reaguoja į iškritusius kritulius. Pavyzdžiui, pirmais dviem minėtais jutikliais nustatyta dirvožemio drėgmė į iškritusius kritulius reaguoja tinkamai, o SMOS – reaguoja, tačiau tiksliai neįvertina dirvožemio drėgmės pokyčio masto (Wanders ir kt., 2012). Kiti tyrimai rodo, kad SMOS gana tiksliai išmatuoja drėgmę, tačiau SMOS jutiklio duomenys geriau koreliuoja su modelio duomenimis nei su *in situ* išmatuota drėgme (Gumuzio ir kt., 2016).

Naudojant palydovinius matavimus galima atlikti ir pačio modelio kalibravimą bei validavimą, ir jeigu modelis tinkamai pateikia tiek metinį ciklą, tiek drėgmės variaciją trumpais laikotarpiais, modelio rezultatai gali būti panaudojami drėgmei vertinti (Wanders ir kt., 2012).

Modeliavimas gali padėti sumažinti taškinių ir palydovinių duomenų matavimų minusus jungiant šiuos duomenis į vieną produktą. Kitaip tariant, galima susieti taškinių matavimų tikslumą ir palydovinių duomenų erdviškumą. Modelis gali būti sukalibruojamas pagal išmatuotos drėgmės matavimus, o vėliau palyginamas su palydovininiais duomenimis nustatant, ar modelį galima taikyti kitose vietovėse. Ypač perspektyvūs giluminio mokymosi modeliai, kurie įtraukia tiek matavimo taškuose išmatuotus, tiek palydovinius duomenis. Jų pateikiami rezultatai viršija palydovinių stebėjimų, modelių, mokomų vien pagal matavimus, bei kitų žemės paviršiaus modelių tikslumą. Būtent palydovinių ir *in situ* išmatuotų duomenų panaudojimas kartu gali sumažinti abiejų matavimų minusus (Liu ir kt., 2022).

Dirvožemio drėgmės modeliavimas gali būti taikomas ir drėgmės pokyčiams dėl klimato kaitos vertinti remiantis įvairiais klimato scenarijais. Tačiau čia taip pat yra neapibrėžtumų, susijusių ne tik su klimato scenarijais, bet ir tuo, kad modeliai sukalibruojami pagal dabartines dirvožemio savybes, kurios su laiku keičiasi. Be to, dirvožemio drėgmė priklauso ir nuo augalijos, o klimato pokyčiai gali paveikti ir ją (Keshta ir kt., 2012).

Modelių, kurie gali įvertinti dirvožemio drėgmę, gali būti įvairių. Pagal modeliuojamą dirvožemio profilį modeliai gali būti skirstomi į *paprastuosius* (turinčius fiksuotą dirvožemių sluoksnių skaičių ir paremti vandens balansu dirvožemio tūryje; jie gali būti vieno ar kelių sluoksnių) ir *kompleksinius* (įtraukia ištisinį dirvožemio profilį) (Ranatunga ir kt., 2008). Pagal vandens dirvožemyje pokyčių nustatymo metodą gali būti skirstomi į *balansinius*

(naudojamos empirinės funkcijos aprašant faktinius procesus), *dinaminis* (naudojami kiek įmanoma tikslesni teoriniai ryšiai), *pusiau dinaminis* (pasižymintys tiek balansinių, tiek dinaminių modelių savybėmis) (Hildreth, 1981; Jackson, 1986).

Dar modeliai gali būti skirstomi į *empirinius* (pagrįsti kokybiniais ryšiais ir skirti bendrai apibūdinti), *mechaninius* (pagrįsti žinomais principais bandant suprasti sistemą), *statinius* (nėra laiko kintamojo), *dinaminis* (turi laiko kintamąjį), *deterministinius* (neturi atsitiktinių kintamųjų) bei *stochastinius* (turi atsitiktinius kintamuosius arba tikimybinus skirstinius) (France ir Thornley, 1984; Lascano, 1991).

Modeliai skiriasi tiek savo kompleksiskumu, tiek įvesties duomenų poreikiais. Tačiau modelio kompleksiskumas ne visada gali lemti didesnę modelio tikslumą (Meng ir Quiring, 2008), ir tinkamas modelio parinkimas gali priklausyti tiek nuo tyrimo tikslo, tiek nuo prieinamų įvertinimui reikalingų duomenų.

Modeliavimo metu svarbiausia tinkamai sukalibruoti modelį, tai yra parinkti modelio parametrus, su kuriais dirvožemio drėgmė būtų apskaičiuojama kiek įmanoma tiksliau. Absoliuti modelio išvesties reikšmių atitiktis išmatuotoms nėra būtina gero modeliavimo sąlyga. Tačiau svarbu, kad modelis tinkamai atspindėtų drėgmės sezoniškumą ir drėgmės kaitą sezono metu (Joris ir Feyen, 2003; Wanders ir kt., 2012). Modelio kalibravimui reikia dirvožemio drėgmės duomenų, nors jų neturint paviršiaus modelių kalibravimui gali būti panaudojami palydoviniai duomenys (Pinnington ir kt., 2018).

Pagrindinė modeliavimo problema yra ta, kad iki šiol nėra įmanoma išmatuoti ir įvertinti kiekvienos atskiros sąveikos tarp atmosferos, hidrosferos ir sausumos (Carlaw, 2000). Modeliai turi būti gana paprasti tam, kad galima būtų modeliuoti naudojant standartinius skaičiavimo išteklius, tačiau kartu jie turi gana gerai įvertinti pagrindinius aplinkoje vykstančius procesus.

Visi modeliai pasižymi tam tikrais neapibrėžtumais ir įvesties duomenys į modelį yra paremti matavimais, kurie taip pat turi savų neapibrėžtumų. Todėl pagrindinis klausimas, į kurį turi būti atsakyta modeliavimo studijose, kaip eksperimento rezultatai ir su tuo susijusios mokslinės išvados yra paveikiamos šių neapibrėžtumų (Koster ir kt., 2015). Balansas tarp modeliavimo tikslumo ir modelio paprastumo ir yra pagrindinis modelių kūrėjų uždavinys (Carlaw, 2000). Estijoje buvo taikytas paprastas vandens balanso modelis vertinant drėgmės pokyčius 2 valandų ir paros žingsniu. Nustatyta, kad modelis pervertino kritulių ir evapotranspiracijos poveikį dirvožemio drėgmei, neįvertindamas, kad vandens balansui dirvožemyje pasiekti reikia laiko. Dėl to daug geresni modeliavimo rezultatai buvo modeliuojant paros žingsniu, o

ne kas 2 val. (Reintam ir kt., 2016). Svarbu pažymėti, kad modelio kalibravimui ar pačiam modeliavimui reikia išmatuotų dirvožemio drėgmės duomenų ar bent vienos drėgmės reikšmės, kuri reikalinga paleisti modelį (Reintam ir kt., 2016).

1.4. Dirvožemio drėgmės tyrimai Europoje ir Lietuvoje

Europoje vidutiniškai didžiausia dirvožemio drėgme pasižymi Alpės, Baltijos ir Vakarų Balkanų šalys bei šiaurės vakarų Europos dalis (Pinke ir kt., 2022). Kartu su kylančia oro temperatūra bei besikeičiančiu kritulių režimu kinta ir dirvožemio drėgmės pasiskirstymas Europoje. Analizuojant daugiamečius (1981–2017 metai) ERA-5 reanalizės dirvožemio drėgmės duomenis nustatyta, kad didžiojoje dalyje Viduržemio jūros, Balkanų bei Rytų Europos regionų per pastaruosius dešimtmečius buvo fiksuojamas sausiausias dirvožemis. Vidutinė metinė prieinama augalams drėgmė sumažėjo beveik visame žemyne, tačiau rytų Europoje daugiausia. Mažiausi dirvožemio drėgmės pokyčiai fiksuoti Šiaurės Europoje. Rytų Europoje fiksuoti dideli pokyčiai ir šiltuoju sezonu, o tai galėjo kelti didelę grėsmę kviečių bei kukurūzų derliui (Pinke ir kt., 2022). Bendras metinis dirvožemio drėgmės mažėjimas Europoje nustatytas nepriklausomai nuo vyraujančio klimato tipo, o intensyviausi pokyčiai nustatyti Rytų ir Vidurio Europoje. Didžiojoje Europos dalyje dirvožemio drėgmė ypač mažėjo balandį, kas lemia vis sausesnę vegetacijos sezono pradžią, bei rudenį (Almendra-Martín ir kt., 2022).

Nors bendras dirvožemio drėgmės trendas yra neigiamas, tačiau kur kas pavojingesnės dažniau pasikartojančios ekstremalios sąlygos. Tyrimuose analizuojant nepalankius meteorologinius reiškinius, sausrų identifikavimo ir poveikio vertinimo tematika yra viena iš dažniausiai tyrinėjamų.

Europa yra nevienalytė ir gali būti suskaidyta į trylika regionų pagal buvusių sausrų laiką, trukmę, stiprumą ir plotą (Markonis ir kt., 2021). Centrinėje ir Šiaurės Europoje sausros formuojasi pavasarį ir vasaros pradžioje dėl kritulių trūkumo ir didesnės evapotranspiracijos, jų trukmė gali siekti apie 4 mėnesius, o Pietų Europoje sausros formuojasi dėl kritulių stygiaus žiemos ir ankstyvo pavasario metu ir jų trukmė siekia apie 7 mėnesius (Markonis ir kt., 2021). Stiprios sausros Europoje siejamos su atmosferos cirkuliacija, NAO fazės nulemiamu audrų tako vietos pokyčiu bei blokavimo procesais. Blokavimas žiemą siejamas su žemės ūkio sausromis pietvakarių Europoje, o vasarą – pietryčių Europoje (Kurnik ir kt., 2015).

Pagal vienus tyrimus, ypač stiprių sausrų, apimančių didelę Europos dalį, pasikartojimas retesnis ir stiprumas yra mažesnis (Hanel ir kt., 2018). Tačiau pagal kitus, vertinant daugiamečius duomenis, Europoje fiksuota daugiau ir stipresnių (Büntgen ir kt., 2021), tačiau vėlyvų sausrų (Almendra-Martín ir kt., 2022). Apskritai imant Europą, šiltuoju sezonu sausrų daugėja centrinėje jos dalyje, o Skandinavijoje mažėja (Markonis ir kt., 2021).

Didesnio erdvinio masto užmirkimų klimatologinių tyrimų yra mažai. Tai gali būti susiję su tuo, kad užmirkimas gali priklausyti nuo labai konkrečių vietos sąlygų, dirvožemio savybių ir ekstremalių kritulių kiekio, trukmės ir dažnumo. Tačiau ekstremalių kritulių metu išskrintančio kritulių kiekio didėjimas bei tokių atvejų dažnėjimas (Pradhan ir kt., 2022; Zeder ir Fischer, 2020) atskleidžia didėjančią ne tik sausrų, bet ir užmirkimų riziką Europoje, todėl klimatas tampa vis ekstremalesnis.

Lietuvoje dirvožemio drėgmės matavimai buvo atliekami epizodiškai. Nuo 1945 iki 1999 metų Lietuvos hidrometeorologijos tarnybos (LHMT) agrometeorologijos stočių tinkle buvo vykdomi gravimetriniai matavimai kas 10 dienų sveriant dirvožemio mėginius ir nustatant drėgmę iki 50 cm gylio ir kartą per mėnesį – iki 100 cm gylio (Lietuvos hidrometeorologijos..., 1998; Vyriausioji hidrometeorologinės..., 1957).

2000 metais buvo uždarytas LHMT agrometeorologijos stebėjimų tinklas ir dirvožemio drėgmės matavimai nutraukti. Pagal LR Vyriausybės patvirtintą Ekstremalių įvykių kriterijų sąrašą (Lietuvos Respublikos..., 2000; Lietuvos Respublikos..., 2006) dirvožemio drėgmės atsargos 0–20 cm ir 0–100 cm dirvožemio sluoksnyje buvo vis dar naudojamos kaip sausras aktyvios augalų vegetacijos laikotarpiu identifikavimo rodikliai (kartu su HTK indeksu), nors matavimai ir nebebuvo vykdomi.

LHMT agrometeorologijos tinklas atkurtas 2009 metais, tačiau matavimai buvo atliekami kitu būdu – naudojant gipsinius dirvožemio drėgmės matuoklius (*Watermark*), tačiau jų drėgmės duomenys nebuvo naudojami stichinei sausras oficialiai identifikuoti (Valiukas, 2015). Dirvožemio drėgmė šiame tinkle buvo matuojama 20, 50 ir 100 cm gylyje centibarais (cbar), reiškiančiais energiją, kurią augalai turi išnaudoti, kad pasisavintų vandenį iš dirvožemio. Kuo didesnė cbar reikšmė, tuo daugiau energijos augalas turi išnaudoti drėgmei iš dirvožemio pasisavinti ir tuo sausesnės sąlygos identifikuojamos (Taparauskienė ir kt., 2013; Valiukas, 2015). Vis dėlto, šių matavimo reikšmių interpretacija priklauso ne tik nuo vertės, bet ir nuo dirvožemio, o tai apsunkina išmatuotų reikšmių interpretavimą. Todėl, norint panaudoti šiuos duomenis sausrų monitoringui, reikia ne tik išsamiai ištyrinėti dirvožemius, kuriuose įmontuoti jutikliai, bet ir sudaryti ryšio kreives tarp drėgmės ir cbar vertės kiekviename dirvožemyje atskirai. Pavyzdžiui,

priemoliai yra įprastai drėgnesni nei priesmėliai, tačiau iš sunkesnio dirvožemio augalams pasisavinti vandenį sudėtingiau dėl didesnio vandens molekulių pritraukimo prie smulkesnių dirvožemio dalelių (Taparauskienė ir kt., 2013).

Nors buvo bandyta eksperimentiniu būdu kelių stočių vietose atlikti lygiagrečius stebėjimus ir įgalinti drėgmės, matuojamos cbar, reikšmių panaudojimą dirvožemio drėgmės monitoringui, tačiau pradiniai duomenys dėl gipsinio *Watermark* jutiklio konstrukcijos ypatumų pasižymėjo mažu duomenų patikimumu ir turėjo daug trūkumų. Pavyzdžiui, drėgmės pokyčių nebuvo galima susieti su meteorologinėmis sąlygomis arba iškritus gausiems krituliams reakcija buvo labai silpna (Nacionalinė mokėjimo..., 2018; Taparauskienė ir kt., 2013). 2020 metais uždarytas agrometeorologijos stočių tinklas dar kartą ir stočių vietoje įrengtos automatinės stotys su meteorologinių stebėjimų programa.

2013 metais Lietuvos žemės ūkio ir konsultavimo tarnyba pradėjo steigti stebėjimų tinklą, kuriame atliekami meteorologiniai ir tokių žemės ūkiui reikalingų elementų matavimai kaip dirvožemio temperatūra ir dirvožemio drėgmė. 2022 metais stočių tinklą sudarė 55 stotys. Vis dėlto jos skirtos matavimams specifinėse vietose (soduose, žemės ūkio laukuose ir kt.) atlikti, siejant su ligų ir kenkėjų plitimo prognozavimui reikalingų duomenų matavimu. Dėl to jų vieta gali neatitikti standartinių meteorologinėms stotims keliamų reikalavimų. Be to, norint jų duomenis panaudoti dirvožemio drėgmei vertinti ir, galbūt, netgi ekstremaliai sausoms ar drėgnoms sąlygoms identifikuoti, reikalinga nuolatinė duomenų kokybės kontrolė, prietaisų kalibravimas ir tyrimai, kurie kol kas nėra atliekami.

Panaši dirvožemio drėgmės stebėjimų situacija ir Estijoje bei Latvijoje, kur agrometeorologijos stočių tinklas uždarytas atitinkamai 2001 ir 2004 metais. Iš kaimyninių šalių tik Lenkija turi automatizuotą agrometeorologinių stebėjimų tinklą, atidarytą 2008 metais (Institute of..., 2022). Tačiau Lenkijoje sausra vertinama taikant klimatinį vandens balanso indeksą CWB (angl. *Climate Water Balance*), skaičiuojamą iš meteorologinių parametrų bei dirvožemio drėgmės duomenų (Institute of..., 2022).

Lietuvoje nėra daug atliktų daugiametės dirvožemio drėgmės kaitos tyrimų. Tai galėjo nulemti, kad drėgmės matavimų metodika Lietuvoje gana kaiti: skiriasi pats matavimo metodas, reguliarumas, tikslumas, o patikimi drėgmės matavimai buvo atliekami iki XXI amžiaus pradžios. Vos keliuose darbuose galima aptikti produktyviosios dirvožemio drėgmės, išmatuotos gravimetriniu metodu, tyrimus (Buitkuvienė, 1999; Krotovas, 2012). Taip pat keli tyrimai atlikti naudojant 2009 metais atnaujinto agrometeorologijos tinklo *Watermark* jutikliu išmatuotus duomenis, kurie gali būti vertinami kaip

turintys daug trūkių, sunkiai interpretuojami ir nepatikimi (Ramonas, 2015; Taparauskienė ir kt., 2013; Valiukas, 2015).

Vis dėlto, Lietuvoje vykdytuose tyrimuose daugiau dėmesio skirta ne dirvožemio drėgmei, o pagal meteorologinius indeksus išskiriamų sausrų tyrimams (Daukaitė, 2013; Galaunaitė, 2014; Jakimavičiūtė, 2008; Ramonas, 2015; Vrublevskytė, 2013; Žukauskaitė, 1999; Žuvininkaitė, 2013) ir palydoviniais metodais nustatytos dirvožemio drėgmės (Žebrauskas, 2013) ar augalijos būklės indeksų vertinimui (Klimavičius, 2022; Mačiulytė, 2017).

Lietuvoje pavojingas reiškinys, *meteorologinė sausra*, identifikuojamas pagal SPI – standartizuotą kritulių indeksą. Stichinė sausra nuo 2020 metų augalų vegetacijos metu identifikuojama pagal temperatūros ir kritulių indeksą TPI. Šis indeksas įtraukas pakeičiant prieš tai buvusį hidroterminį Selianinovo koeficientą HTK, kuriuo nebuvo galima identifikuoti ankstyvųjų vegetacijos sezono sausrų. Po 2018 ir 2019 metų sausų pavasarių, kurių HTK faktiškai neidentifikavo, iškilo poreikis atnaujinti sausrų išskyrimo metodiką (Nacionalinė mokėjimo..., 2019).

Iki 2018 metų nebuvo indekso, kuriuo galima būtų identifikuoti ilgai trunkantį lietingą laikotarpį. Vienintelis indeksas, įtrauktas į stichinių reiškinų sąrašus, apima 5 dienų kritulius, kuriems viršijus mėnesio kritulių kiekį 2–3 kartus skelbiamas stichinis reiškinys, o daugiau nei 3 – katastrofinis. Tačiau 2017 metų situacija iškelė poreikį kurti naują indeksą. 2017 metais atskirose Lietuvos vietose kelis mėnesius iš eilės buvo viršijamas mėnesio kritulių kiekis, kai kur – net kelis kartus. Tai nulėmė didžiulius, nekompensuojamus nuostolius, kadangi buvo sutrukdyta javapjūtė, sumažėjo derlius, jo kokybė, o kai kur derliaus visai nebuvo įmanoma nuimti. O rudeniop nebuvo galima paruošti žemės ūkio paskirties laukų žiemai arba žieminių augalų sėjai. Dėl tokio poreikio buvo sukurtas rodiklis, kuriuo remiantis nustatomas stichinis meteorologinis reiškinys – *ilgas lietingas laikotarpis*. Šis rodiklis sukurtas naudojant 60 dienų kritulių kiekį ir siejant jo poveikį su galimu ilgalaikiu dirvožemio prisotinimu (Nacionalinė mokėjimo..., 2018).

Kaip ir Lietuvoje, taip pat Estijoje bei Latvijoje, sausos ir per daug drėgnos sąlygos identifikuojamos pagal meteorologinius parametrus (Tammets ir Jaagus, 2013).

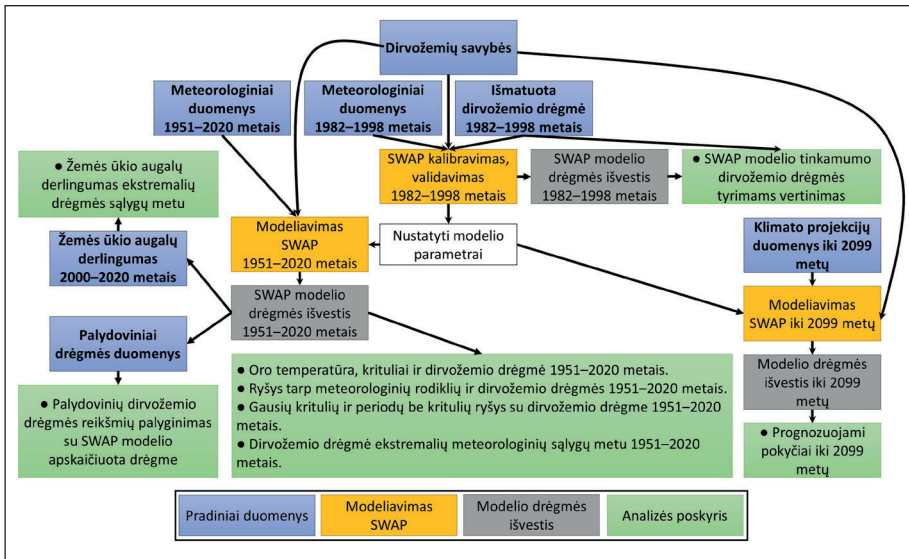
Dirvožemio drėgmė tyrimų objektu kaimyninėse valstybėse (Latvija, Estija, Lenkija) tampa žemės įdirbimo (Reintam ir kt., 2016), dirvožemio drėgmės palydovinių duomenų panaudojimo (Usowicz ir kt., 2019) ir verifikavimo (Rojek ir kt., 2014) tyrimuose. Taip pat neapsieinama ir be dirvožemio drėgmės modeliavimo (Taparauskienė ir Heng, 2008), prieinamų

modeliuotos drėgmės produktų (Somorowska, 2017) ir ekstremalių reiškinių (Pińskwar ir kt., 2020) analizės.

Dirvožemio drėgmės pokyčiai dėl klimato kaitos kelia iššūkių visoje Europoje. Prognozių sudarymas ir galimų pokyčių vertinimas XXI amžiuje taip pat yra viena iš tyrimo temų (Piniewski ir kt., 2020; Sawicka ir kt., 2022; Stonevičius ir kt., 2008), nes gali prisidėti prie su klimato kaita susijusių rizikų valdymo sprendimų priėmimo.

2. DUOMENYS IR METODIKA

Šiame skyriuje aprašomas dirvožemio drėgmės modeliavimui taikomas SWAP modelis, įvesties duomenys, jo kalibravimas ir validavimas bei išvesties duomenys. Taip pat aprašyti modeliuojami taškai, kurie toliau analizuojami tyrime, modelio kalibravimui ir validavimui naudojami išmatuoti dirvožemio drėgmės duomenys ir jų matavimo metodika. Pristatomi modeliavime ir tyrimo analizėje naudojami meteorologiniai rodikliai, naudoti palydoviniai drėgmės produktai, žemės ūkio augalų derlingumo statistikos duomenys bei klimato prognozėms naudojami pradiniai duomenys. Taip pat pateikiama meteorologinių sąlygų analizės, sausų ir lietingų laikotarpių išskyrimo ir analizės, klimato prognozių iki XXI amžiaus pabaigos sudarymo ir analizės metodika. Pagrindiniai tyrimo žingsniai schemiškai pavaizduoti 2.1 pav.



2.1 pav. Principinė modeliavimo ir darbe vykdytos analizės schema.

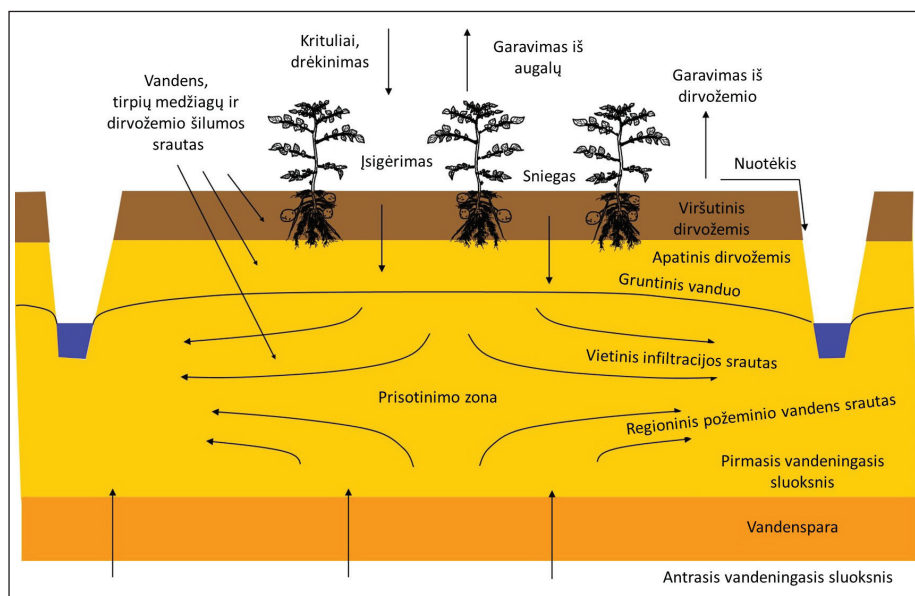
2.1. Dirvožemio drėgmės modeliavimas SWAP modeliu

2.1.1. Modelio aprašymas bei įvesties ir išvesties duomenys

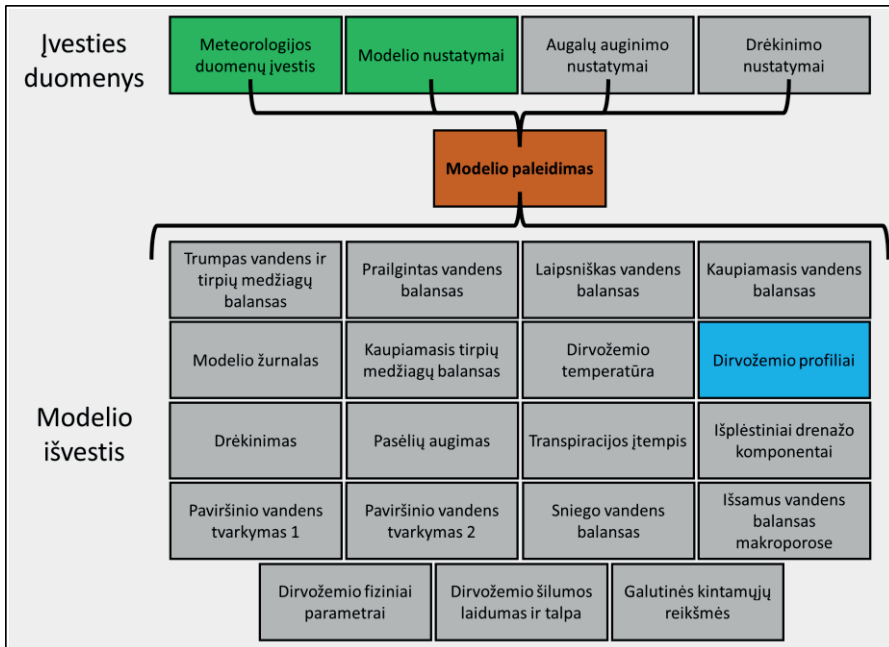
SWAP (angl. *Soil Water Atmosphere Plant*, <https://www.swap.alterra.nl/>) modelis yra sukurtas Aplinkos tyrimų centre Wageningeno (Wageningen) universitete, Nyderlanduose. Tyrime taikoma SWAP 4 versija (versija 4.0.1), išleista 2017 gegužės 17 dieną, tačiau, kaip teigia autoriai, šis modelis turi

didesnę nei 40 metų taikymo istoriją (Kroes ir kt., 2017). Pirmoji modelio versija pavadinimu SWATR sukurta dar 1978 metais. Modelis skirtas imituoti vandens, tirpiųjų medžiagų ir šilumos srautus dirvožemyje, vertinant sąveiką tarp dirvožemio, vandens, augalijos ir atmosferos per visą vegetacijos sezoną. Modelis yra vienos dimensijos, kuri aprėpia zoną nuo viršutinės augalijos dalies iki požeminio vandens sluoksnio viršaus. Modeliuojamo sluoksnio viršutinė dalis gali sąveikauti su paviršiumi (2.2 pav.). Šioje modelio zonoje vertinamas vertikalus vandens, tirpiųjų medžiagų ir šilumos transportas. Vertikalus vandens srautas dirvožemyje apskaičiuojamas taikant Ričardso lygtį, skirtą dirvožemio drėgmės judėjimui įvairiai prisotintame dirvožemyje imituoti. Ši lygtis paremta dalinės diferencialinės lygties sprendimu ir yra sudėtingai sprendžiama dėl savo hiperbolinio pobūdžio, dirvožemio hidraulinių funkcijų netiesiškumo bei greitai besikeičiančių sąlygų netoli dirvožemio paviršiaus (Kroes ir kt., 2017). Modelis sudarytas iš įvairių įvesties ir išvesties duomenų modulių (2.3 pav.).

SWAP programoje parinkta skaitmeninė schema, kuri tikslingai išsprendžia vienmatę Ričardso lygtį su tikslios masės balanso kontrolės procedūra. Ši schema leidžia tiksliai kontroliuoti greitą dirvožemio vandens judėjimą prasiskverbimo metu į sausą dirvožemį. Be to, ši schema yra efektyvi skaičiavimo požiūriu (van Dam ir Feddes, 2000). Lygtis išsamiai aprašoma Kroes ir kt. (2017).



2.2 pav. SWAP modelio sritis ir dinaminiai srautai (pagal Kroes ir kt., 2017).



2.3 pav. SWAP modeliui paleisti reikalingų įvesties ir išvesties duomenų schema (pagal Kroes ir kt., 2017). Žaliai pažymėtos tyrime naudotos įvestys, o mėlynai – naudota išvestis.

Meteorologiniai įvesties duomenys. SWAP modeliavimo metu modeliui pateikiamos kiekvieno modeliuojamo taško meteorologinių matavimų reikšmės:

- minimali paros oro temperatūra (T_{\min} , °C);
- maksimali paros oro temperatūra (T_{\max} , °C);
- kritulių kiekis per parą (P , mm);
- evapotranspiracija (ET_{ref} , mm). ET_{ref} apskaičiuota pagal Hargreivio (Hargreaves, 1994) metodą, naudojant kiekvieno mėnesio vidutinės minimalios ir maksimalios oro temperatūros ir taško platumos duomenis. ET_{ref} apskaičiuota naudojant R paketą SPEI (Beguería ir Vicente-Serrano, 2017). Gauta ET_{ref} reikšmė dalinama iš dienų skaičiaus per mėnesį, priskiriama kiekvieno mėnesio 15-tai dienai ir atliekama interpoliacija, taip gaunant kasdienes ET_{ref} .

Informacija apie dirvožemį modeliuojamuose taškuose. Modeliui reikalingo išsamaus dirvožemius aprašančių savybių ir koeficientų rinkinio Lietuvos hidrometeorologijos tarnybos archyvuose nėra. Archyvuose buvo pateiktas tik dirvožemio tūrinis svoris (2.1 lentelė, V_{sv}), iš kurio buvo apskaičiuojamas sauso dirvožemio tankis (modelyje BDENS, mg^3/cm^3 ,

2.2 lentelė) bei apibendrintos dirvožemio savybės, leidžiančios sumažinti galimas skirtingiems dirvožemiams parenkamų koeficientų kombinacijas, pateikiamas modelio aprašyme (Kroes ir kt. (2017) pagal Wösten ir kt. (2013). Dirvodarinės uolienos granulimetrinės sudėties pagal Fere trikampį (toliau – *granulimetrinė sudėtis*) duomenys (smėlio, molio, dulkių ir organinės medžiagos dalis, %) buvo parinkti iš Europos dirvožemio duomenų centro (ESDAC, angl. *European Soil Database Derived data*; 1 km skiriamoji geba) duomenų bazės. Dirvožemio savybės pasižymi teritoriniu nehomogenišku ir nėra tiksliai žinoma, kurioje konkrečioje vietoje kiekvienas dirvožemio drėgmės matavimas buvo atliekamas. Dėl šios priežasties modelio įvesčiai reikalinga smėlio (PSAND), molio (PCLAY), dulkių (PSILT) ir organinės medžiagos (ORGMAT) dalis (g/g) iš ESDAC duomenų bazės parinkta, atsižvelgiant į aplink meteorologijos stotį vyraujančių dirvožemių granulimetrinę sudėtį. Pažymėtina, kad LHMT agrometeorologijos žinynuose pateikiama apibendrinta informacija apie dirvožemį (2.1 lentelė) ne visais atvejais atitinka nustatytą granulimetrinę sudėtį pagal Fere grafinės išraiškos trikampį ir ESDAC duomenis, tačiau tai nedaro poveikio modeliavimo rezultatams, nes kalibravimo metu parenkami parametrai (pagal Kroes ir kt., 2017) dažniausiai vienodai tinkami tiek priesmėliui, tiek smėliui. Tyrime analizuojamos šešios stotys sujungtos į dvi grupes – priemolingi ir priesmėlingi dirvožemiai (2.1 lentelė).

ESDAC duomenų bazėje dirvožemio savybės pateikiamos dviejų sluoksnių: 0–30 cm (viršutinio, angl. *Topsoil*) ir 30–200 cm (apatinio, angl. *Subsoil*), todėl SWAP modelyje parinkti du atitinkamo storio sluoksniai visam dirvožemio profiliui modeliuoti. Modeliuojant dirvožemio profilis padalintas į pagrindinius du sluoksnius (2.1 lentelė):

- viršutinį 0–30 cm sluoksnį (pagal modelį ISOILLAY 1), jam priskirtos 0–30 cm dirvožemio savybės (pagal ESDAC *Topsoil*);
- apatinį 30–360 cm (pagal modelį ISOILLAY 2), jam priskirtos 30–200 cm dirvožemio savybės (pagal ESDAC *Subsoil*).

Modeliavimas atliktas kas 1 cm.

Kiti modelio nustatymai. SWAP modeliavimo metu nurodoma kiekvieno modeliuojamo taško pagrindinė informacija apie:

- modeliuojamą laikotarpį. Modelio kalibravimo laikotarpis apima 1982–1991 metus, validavimo – 1992–1998 metus, visas praeities modeliavimo laikotarpis apima 1951–2020 metus ir ateities modeliavimas pagal klimato modelių pateikiamus prognostinius meteorologinių rodiklių dydžius apima 1970–2099 metus;

2.1 lentelė. Modeliavime naudojamų stočių informacija: dirvožemio drėgmės matavimų laikotarpis, meteorologijos stočių koordinatės (š. pl., °; r. ilg., °) ir aukštis virš jūros lygio (H, m), laboratoriniu būdu nustatytos dirvožemio ne produktyviosios drėgmės (D_{r15} , mm, 0–20 cm vidurkis), dirvožemio tūrinio (sausos masės) svorio (V_{sv} , g/cm³, 0–20 cm vidurkis) reikšmės, dirvožemio savybės pagal archyvinę LHMT informaciją* bei LTK-99 klasifikaciją**. Pagal ESDAC pateikiama smėlio, dulkių, molio ir organinės medžiagos dalis (g/g) dirvožemiuose, dirvožemio tipas pagal Fere trikampį*** ir apibendrinta stočių grupių granuliometrinė sudėtis pagal archyvinę LHMT informaciją****.

| Stotis | Metai | Duomenys pagal LHMT | | | | Pagal LTK-99** | Duomenys pagal ESDAC | | | | | | Grupė*** |
|------------------|-----------|---------------------|-------|-----------------|---------------------|--|----------------------|----------------|----------------|---------------|---------------------|-----------------------------|-------------------------|
| | | Stoties | | V _{sv} | Dirvožemio savybės* | | Gylis, cm | Smėlis (PSAND) | Dulkės (PSILT) | Molis (PCLAY) | Org. medž. (ORGMAT) | Pagal Fere*** | |
| | | š. pl. r. ilg. | H | | | | | | | | | | |
| Dotnuva | 1982–1998 | 55,40 | 23,87 | 69 | 1,6 | Velėninis jaurinis glėjinis lengvas priemolis | 0–30 | 0,45 | 0,36 | 0,19 | 0,01 | Vidutinio sunkumo priemolis | Priemolingi dirvožemiai |
| | | | | | | | 30–360 | 0,39 | 0,34 | 0,27 | 0,005 | Vidutinio sunkumo priemolis | |
| Kaunas | 1982–1988 | 54,88 | 23,84 | 76 | 1,2 | Velėninis jaurinis priemolis | 0–30 | 0,53 | 0,24 | 0,23 | 0,005 | Smėlingas sunkus priemolis | Priemolingi dirvožemiai |
| | 1996–1998 | | | | | | 30–360 | 0,47 | 0,23 | 0,3 | 0,003 | Smėlingas sunkus priemolis | |
| Raseiniai | 1982–1986 | 55,40 | 23,13 | 111 | 1,33 | Velėninis jaurinis glėjinis lengvas priemolis | 0–30 | 0,31 | 0,54 | 0,15 | 0,016 | Dulkiskas priemolis | Priemolingi dirvožemiai |
| | 1988–1998 | | | | | | 30–360 | 0,24 | 0,5 | 0,26 | 0,002 | Dulkiskas priemolis | |
| Lazdijai | 1982–1998 | 54,23 | 23,51 | 133 | 1,65 | Priesmėlis | 0–30 | 0,85 | 0,1 | 0,05 | 0,01 | Rišlus smėlis | Priemolingi dirvožemiai |
| | | | | | | | 30–360 | 0,86 | 0,1 | 0,04 | 0,005 | Rišlus smėlis | |
| Utena | 1982–1998 | 55,52 | 25,59 | 105 | 6 | Velėninis jaurinis silpnai nujaurėjęs priesmėlis | 0–30 | 0,89 | 0,06 | 0,05 | 0,005 | Smėlis | Priemolingi dirvožemiai |
| | | | | | | | 30–360 | 0,89 | 0,06 | 0,05 | 0,003 | Smėlis | |
| Varėna | 1982–1991 | 54,25 | 24,55 | 109 | 6 | Velėninis jaurinis priesmėlis | 0–30 | 0,9 | 0,05 | 0,05 | 0,004 | Smėlis | Priemolingi dirvožemiai |
| | 1993–1998 | | | | | | 30–360 | 0,9 | 0,05 | 0,05 | 0,002 | Smėlis | |

2.2 lentelė. Parinkti SWAP modelio parametrai (Kroes ir kt. (2017) pagal Wösten ir kt. (2013) kiekvienai meteorologijos stocijai pagal mažiausią RMSE bei didžiausią determinacijos koeficientą R^2 tarp modelio išvesties dirvožemio drėgmės ir išmatuotos drėgmės.

| Paaškinimas | Stotis | | Dotnuva | | Kaunas | | Raseiniai | | Lazdijai | | Utena | | Varėna | | | | | |
|---|-----------|----------|---------|--------|--------|--------|-----------|--------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | Gylis, cm | Profilis | 0-30 | 30-360 | B9 | O4 | 0-30 | 30-360 | B9 | O9 | 0-30 | 30-360 | B2 | O1 | 0-30 | 30-360 | B2 | O3 |
| Dirvožemio sluoksnio numeris | ISOILLAY1 | | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| Likutinis vandens kiekis, cm ³ /cm ³ | ORES | | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Prisotinto vandens kiekis, cm ³ /cm ³ | OSAT | | 0,43 | 0,36 | 0,43 | 0,41 | 0,43 | 0,41 | 0,43 | 0,51 | 0,43 | 0,35 | 0,43 | 0,35 | 0,43 | 0,34 | 0,43 | 0,34 |
| Pagrindinės džiūvimo kreivės alfa parametras, cm | ALFA | | 0,0065 | 0,0216 | 0,0065 | 0,0280 | 0,0065 | 0,0280 | 0,0065 | 0,0224 | 0,0123 | 0,0224 | 0,0224 | 0,0220 | 0,0224 | 0,0265 | 0,0224 | 0,0265 |
| Parametras n | NPAR | | 1,325 | 1,540 | 1,325 | 1,283 | 1,325 | 1,283 | 1,325 | 1,152 | 1,436 | 2,186 | 1,436 | 2,186 | 1,436 | 1,543 | 1,436 | 1,543 |
| Hidraulinio laidumo funkcijos parametras Ksat, cm/d | KSATFIT | | 1,54 | 53,10 | 1,54 | 24,00 | 1,54 | 24,00 | 1,54 | 32,21 | 39,10 | 32,21 | 99,70 | 32,21 | 44,60 | 44,60 | 32,21 | 44,60 |
| Hidraulinio laidumo funkcijos eksponentė | LEXP | | -2,161 | -0,520 | -2,161 | -1,559 | -2,161 | -1,559 | -2,161 | -0,304 | -2,023 | -0,304 | 0,796 | -0,304 | -0,333 | -0,333 | -0,304 | -0,333 |
| Pagrindinės drėkinimo kreivės alfa parametras histerezės atveju, cm | ALFAW | | 0,0454 | 0,0454 | 0,0454 | 0,0454 | 0,0454 | 0,0454 | 0,0454 | 0,0454 | 0,0454 | 0,0454 | 0,0454 | 0,0454 | 0,0454 | 0,0454 | 0,0454 | 0,0454 |
| Dirvožemio porų oro slėgis, cm | H ENPR | | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Išmatuotas hidraulinis laidumas prisotinimo sąlygomis cm/d | KSATEXM | | 15,56 | 54,56 | 15,56 | 25,56 | 15,56 | 25,56 | 15,56 | 32,56 | 40,56 | 32,56 | 99,56 | 32,56 | 44,56 | 44,56 | 32,56 | 44,56 |
| Sauso dirvožemio tankis, mg/ cm ³ | BDENS | | 1633,3 | 1828,6 | 1233,3 | 1514,3 | 1370,0 | 1740,0 | 1666,7 | 1742,9 | 1566,7 | 1642,9 | 1603,3 | 1717,1 | 1603,3 | 1717,1 | 1603,3 | 1717,1 |

- auginamus augalus. Šiame tyrime atliktas modeliavimas dirvožemio profilio, esančio po papildomai nedrėkinama žoline danga (kaip ir buvo matuojama dirvožemio drėgmė meteorologijos stotyse su dirvožemio drėgmės matavimų programa (2.2.1 poskyris);
- kitus pasirinkimus. Šaknų zonos gylis (ROOT, cm) visiems taškams parinktas 130 cm (pagal ESDAC). Kalibruojant modelį pasirinkta, kad krituliai traktuojami kaip krintantis sniegas esant $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir žemesnei oro temperatūrai, o vandens judėjimas dirvožemyje baigiasi, kai dirvožemio temperatūra nukrinta iki $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Modelis taip pat skaičiuoja požeminio vandens lygį. Modeliuojamo laikotarpio pradžiai visoms stotims buvo priskirta 2,5 metrų gylio vandens lygio reikšmė, tačiau šis dydis esminio poveikio požeminio vandens lygio skaičiavimams neturėjo.

Modelio išvestis. Dirvožemio drėgmė modeliuotame dirvožemio profilyje pateikiama kartu su kitais dirvožemio išvesties parametrais (vandens sluoksnio storis, tirpiosios medžiagos koncentracija, dirvožemio temperatūra, vandens ir tirpiųjų medžiagų srautas). Dirvožemio drėgmė modelyje pateikiama kaip dirvožemio sluoksnio drėgmės (cm^3/cm^3) vidurkis (apskaičiuotas vienam sluoksnio centimetrui), o išmatuota dirvožemio drėgmė stotyse yra nurodoma milimetrais (mm) tam tikrame dirvožemio sluoksnyje. Dėl to modelio dirvožemio drėgmės išvestis perskaičiuojama iš cm^3/cm^3 0–20 cm į sluoksnio dirvožemio drėgmę milimetrais.

2.1.2. Modelio kalibravimas ir validavimas

SWAP modelio apraše (Kroes ir kt. (2017) pagal Wösten ir kt. (2013) pateikiami eksperimentiniu būdu Nyderlanduose nustatyti skirtingų dirvožemių modelio parametrai. Neturint visų modeliui reikalingų parametru reikšmių, modelio kalibravimo metu yra parenkamas tinkamiausias dirvožemio parametru rinkinys (2.2 lentelė), su kuriuo modelio išvestis kalibravimo laikotarpiu yra artimiausia išmatuotai dirvožemio drėgmei.

Modelio kalibravimas atliekamas parenkant tuos koeficientus, kuriuos naudojant gaunamas mažiausias RMSE (vidutinė kvadratinė paklaida) ir didžiausias determinacijos koeficientas R^2 tarp modelio išvesties ir išmatuotų dirvožemio drėgmės duomenų kalibravimo laikotarpiu 1982–1991 metų gegužės–rugsėjo mėnesiais. Šie statistiniai rodikliai yra dažnai tyrimuose naudojami vertinant išmatuotų ir sumodeliuotų dydžių glaudumą. Atlikus modeliavimą ir parinkus tinkamiausius modelio parametrus, buvo

patikrinamas parametų tinkamumas (atliekamas validavimas) 1992–1998 metų laikotarpiui, kuris nebuvo įtrauktas į kalibravimo etapą. Validavimo metu modelio dirvožemio drėgmė lyginama su tuo pačiu laikotarpiu išmatuota dirvožemio drėgme ir įvertinama, ar RMSE ir R^2 yra artimi kalibravimo metu nustatytoms reikšmėms. Tai, kad kalibravimo ir validavimo metu RMSE ir R^2 yra artimos, reiškia, kad modelis tinka dirvožemio drėgmės modeliavimui.

Atlikus modelio kalibravimą ir validavimą, buvo atliekamas viso praeities laikotarpio (1951–2020 metais) modeliavimas pagal meteorologijos stočių duomenis bei modeliavimas iki 2099 metų pagal klimato prognozių duomenis. Dirvožemio drėgmės modeliavimas SWAP modeliu atliktas paros žingsniu.

2.2. Pradiniai duomenys

2.2.1. Pradiniai dirvožemio drėgmės duomenys

Lietuvoje dirvožemio drėgmės matavimai gravimetriniu (svėrimo) metodu buvo atliekami nuo 1945 iki 1999 metų. Šis matavimo metodas yra laikomas standartiniu ir vieninteliu tiesiogiai išmatuojančiu vandens kiekį dirvožemyje (Carlaw, 2000; Dorigo ir kt., 2011), todėl šie duomenys ir naudojami SWAP modelio kalibravimui ir validavimui. Pradiniai dirvožemio drėgmės duomenys surinkti iš Lietuvos hidrometeorologijos tarnybos archyvo.

Produktyvioji drėgmė – drėgmė, kurią augalas gali pasisavinti iš dirvožemio (Navickas, 2008). Lietuvos hidrometeorologijos tarnybos (LHMT) agrometeorologijos archyvuose pateikiamas 0–10, 0–20 ir 0–50 cm sluoksniuose esančios produktyviosios drėgmės kiekis (mm), gravimetriniu metodu matuotas apytiksliai kas 10 dienų. 0–100 cm matavimai buvo atliekami daugiausia vieną kartą per mėnesį – paskutinio matavimo per mėnesį metu. LHMT archyvuose išlikę tik produktyviosios drėgmės matavimai.

Neproduktyvioji drėgmė – augalams neprieinama drėgmė dirvožemyje (Navickas, 2008). Nereguliais laiko intervalais buvo atliekamas neproduktyviosios dirvožemio drėgmės kiekio (mm) iki 1 metro gylio dirvožemio sluoksniuose kas 10 cm nustatymas laboratorijoje, tačiau nėra aišku, kaip dažnai tai buvo atliekama. LHMT archyve išliko tik 1992–1998 metų neproduktyviosios drėgmės duomenys (2.1 lentelė), o senesnių neproduktyviosios drėgmės reikšmių archyvuose nerasta. Neproduktyviosios drėgmės kiekis buvo nustatytas skirtingiems dirvožemio sluoksniams (0–10 cm, 10–20 cm ir pan.) kiekvienai stočiai atskirai. Jis naudojamas apskaičiuojant produktyviąją drėgmę (kurią augalai gali įsisavinti) iš

gravimetriniu metodu išmatuotos bendrosios drėgmės tame gylyje atimant laboratorijoje nustatytą neproduktyviąją.

Bendroji drėgmė – tai bendras dirvožemyje esančio vandens kiekis. Kadangi LHMT archyvuose išlikusi tik produktyvioji dirvožemio drėgmė, bendroji drėgmė šiame tyrime apskaičiuota prie produktyviosios dirvožemio drėgmės pridėdant neproduktyviąją (Dr_n), kuri nustatyta laboratorijoje. Bendroji drėgmė toliau naudojama SWAP modelio kalibravimo ir validavimo metu. Toliau bendroji dirvožemio drėgmė tyrime yra vadinama *išmatuota dirvožemio drėgme*.

1982–1998 metais gravimetriniu metodu išmatuota dirvožemio drėgmė naudojama SWAP modelio kalibravimui ir validavimui (2.1 lentelė). Drėgmės matavimai buvo vykdomi ir 1999 metais, tačiau ne visų stočių duomenys išlikę archyvuose, todėl šių metų duomenys nėra naudojami. Nors bendras matavimų laikotarpis yra ilgesnis (nuo 1945 metų), tačiau nuo 1982 metų duomenys pasižymi didesniu homogeniškumu bei turi daug mažiau trūkių.



2.4 pav. Meteorologijos stotys, kuriose išmatuoti meteorologiniai ir dirvožemio drėgmės duomenys naudojami disertaciniame darbe.

Tyrime pasirinktos 6 meteorologijos stotys (2.4 pav.), kuriose analizuojamu laikotarpiu išmatuotos drėgmės sekos pasižymi didžiausiu homogeniškumu. Remiantis šių stočių meteorologiniais ir dirvožemio duomenimis buvo atliktas kalibravimas ir validavimas. Dalis stočių (Dotnuva, Kaunas, Raseiniai) reprezentuoja intensyviausios žemdirbystės regioną Vidurio Lietuvoje, kuris pasižymi didesniu našumu (Valstybės žemės..., 2018), vyraujančiais sunkesniais dirvožemiais (Volungevičius ir Kavaliauskas, 2012) ir intensyvesne žemės ūkio veikla. Kita dalis (Lazdijai,

Utena, Varėna) reprezentuoja rytinį ir pietinį regioną, kuriame vyrauja lengvesnės sudėties dirvožemiai (Volungevičius ir Kavaliauskas, 2012) ir mažesnio intensyvumo žemės ūkio veikla.

Analizuojamu 1982–1998 metų laikotarpiu vykdant agrometeorologinių matavimų programą dirvožemio drėgmės matavimai buvo atliekami įvairaus tipų žemės ūkio augalų laukuose bei ganyklose po žoline danga. Žemės ūkio laukuose matavimai pavasarį buvo atliekami tiek plikame dirvožemyje (ankstyvą pavasarį prieš sėjos metą), tiek vykdant įvairius žemės ūkio darbus sezono viduryje ir pabaigoje (Lietuvos hidrometeorologijos..., 1998). Atskirais metais dėl sėjomainos, dirvožemio drėgmės matavimų vietos žemės ūkio laukuose keitėsi. Dėl laukelių pastovumo ir mažo ūkinės veiklos poveikio šiame tyrime naudojami tik po žoline danga pastoviuose matavimų laukeliuose atlikti dirvožemio drėgmės matavimai.

Matavimai buvo atliekami ir kitais metų mėnesiais, tačiau tik gegužės–rugšėjo mėnesiais visose analizuojamose stotyse per visą tiriamą laikotarpį matavimai buvo vykdomi reguliariais laiko intervalais, todėl būtent šis žemės ūkiui svarbiausias metų laikotarpis ir yra analizuojamas šiame darbe. Archyvuose nėra išlikusių kai kurių stočių atskirų metų ir pavienių matavimų duomenų (2.1 lentelė).

Dažniausiai drėgmės matavimai buvo atliekami kas 10 dienų – septintą (7, 17, 27 dieną) arba aštuntą (8, 18, 28 dieną) dešimtadienio dieną. Tačiau matavimai galėjo būti atliekami ir kitomis dienomis, jeigu matavimo dieną stipriai lijo. Matavimų dieną dirvožemio mėginiai buvo paimami, pasveriami, džiovinami apie 100–105 °C temperatūroje (nes 100–105 °C temperatūroje pasišalina net ir prie dirvožemio dalelių prisijungusi higroskopinė drėgmė (Navickas, 2008) džiovinimo krosnelėje, priklausomai nuo dirvožemio savybių 6–12 val., ir vėl pasveriami, taip įvertinant džiovinimo metu išgaravusio vandens kiekį – bendrąją dirvožemio drėgmę. Ją išmatavus buvo atliekami tolimesni skaičiavimai – atimama neproduktyvioji dirvožemio drėgmės reikšmė apskaičiuojant produktyviąją drėgmę (Lietuvos hidrometeorologijos..., 1998; Vyriausioji hidrometeorologinės..., 1957), kuri ir buvo įrašyta į Lietuvos hidrometeorologijos tarnybos archyvus.

Modelio kalibravimui ir validavimui reikalingos kokybiškų duomenų sekos, todėl LHMT agrometeorologijos archyvuose pateiktiems dirvožemio drėgmės rodikliams atlikta dviejų etapų duomenų kokybės analizė.

Pirminė duomenų kokybės analizė. Visame tyrime buvo naudojami 0–20 cm dirvožemio drėgmės duomenys, o 0–5 cm gylio duomenys naudoti lyginant modeliavimo rezultatus su palydovinių matavimų duomenimis. Pirminės duomenų kokybės analizės metu buvo naudojami trijų sluoksnių

(0–10, 0–20 ir 0–50 cm) dirvožemio drėgmės matavimų rezultatai. Atliekant pirminį dirvožemio drėgmės duomenų apdorojimą atmesti tie matavimai, kurie neatitinka matavimų logikos. Pavyzdžiui, plonesnio dirvožemio sluoksnio drėgmė yra didesnė nei storesnio sluoksnio (0–10 cm drėgmė yra didesnė nei 0–20 cm ar 0–20 cm drėgmė nei 0–50 cm), kadangi storesnio sluoksnio drėgmė yra visų aukščiau esančių sluoksnių drėgmės reikšmių suma. Atmetus tokius klaidingus duomenis, determinacijos koeficientas R^2 atskirose stotyse išaugo 0,05–0,17.

Antrinė duomenų kokybės analizė taikant daugianarę regresiją. Daugianarės regresijos metodas pasitelkiamas įvertinant 0–20 cm dirvožemio drėgmės ir meteorologinių parametrų duomenų glaudumą siekiant atmesti išskirtis. Tam naudojamas apskaičiuotas dirvožemio drėgmės pokytis tarp atskirų matavimų bei vyravusios tarp tų pačių matavimų meteorologinės sąlygos: iškritęs kritulių kiekis ir vidutinė oro temperatūra. Kadangi dirvožemio drėgmės duomenų sekose yra trūkių, tai dirvožemio drėgmės pokyčio ir to laikotarpio meteorologinių sąlygų vertinimas atliekamas tų matavimų, tarp kurių buvo ne didesnis nei 15 dienų skirtumas. Didesniu laiko žingsniu atliktus drėgmės matavimus gali būti sunku susieti su konkrečiomis meteorologinėmis sąlygomis dėl didelio temperatūros ir kritulių kintamumo laike.

2.3 lentelė. 0–20 cm dirvožemio sluoksnio drėgmės matavimų skaičius atlikus pirminę analizę (N_p), anomalių reikšmių, išskirtų taikant daugianarę regresiją duomenų kokybės patikrai, skaičius (N_{at}) bei determinacijos koeficientas prieš ($R^2_{prieš}$) ir po (R^2_{po}) anomalių reikšmių atmetimo 1982–1998 metais. z, a, b, c – regresinės tiesės koeficientai, naudojami 1 lygtyje.

| Stotis | N_p | N_{at} | $R^2_{prieš}$ | R^2_{po} | Daugianarės regresijos koeficientai | | | |
|-----------|-------|----------|---------------|------------|-------------------------------------|--------|---------|--------|
| | | | | | z | a | b | c |
| Dotnuva | 249 | 10 | 0,68 | 0,75 | 40,5316 | 0,5238 | -1,4350 | 0,4924 |
| Kaunas | 150 | 6 | 0,73 | 0,78 | 21,4088 | 0,2536 | -0,8228 | 0,7373 |
| Raseiniai | 235 | 10 | 0,58 | 0,75 | 20,2194 | 0,3296 | -0,5057 | 0,6195 |
| Lazdijai | 252 | 10 | 0,68 | 0,75 | 21,6599 | 0,4028 | -0,8709 | 0,5109 |
| Utena | 252 | 10 | 0,60 | 0,68 | 27,2879 | 0,3553 | -1,0229 | 0,3971 |
| Varėna | 237 | 10 | 0,62 | 0,72 | 16,6120 | 0,3770 | -0,6631 | 0,4895 |

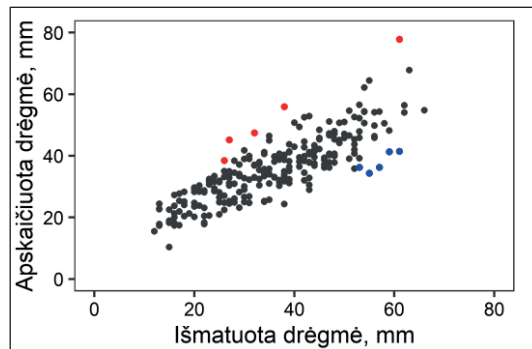
Šiam tikslui buvo taikoma daugianarės regresijos lygtis:

$$SM_x = z + SM_{x-1} \times a + T_{vid} \times b + P \times c, \quad (1)$$

čia SM_x – x datos dirvožemio drėgmės reikšmė; SM_{x-1} – vienu matavimu anksčiau išmatuota dirvožemio reikšmė; T_{vid} – vidutinė oro temperatūra per

laikotarpį tarp matavimų; P – kritulių suma per laikotarpį tarp matavimų; koeficientai z , a , b , c (2.3 lentelė).

Atlikus daugianarės regresijos analizę atmesti tie matavimai, kurių skirtumas nuo sudarytos regresijos lygties pagal (1) lygtį sudaro 2 % didžiausių teigiamų ir 2 % mažiausių neigiamų reikšmių (iš viso atmesta 4 % duomenų). Toks kriterijus yra naudojamas kituose tyrimuose (Peek ir kt., 2021). Pavyzdys pateiktas 2.5 pav.



2.5 pav. Išmatuota (x ašis) ir taikant daugianarės regresijos lygtį (1) lygtis apskaičiuota (y ašis) 0–20 cm sluoksnio dirvožemio drėgmė Lazdijuose 1982–1998 metais gegužės–spalio mėnesiais. 2 % didžiausiais teigiamais skirtumais nuo regresinės tiesės pasižyminčios reikšmės pažymėtos raudonai, o 2 % mažiausiais neigiamais – mėlynai.

2.2.2. Pradiniai meteorologiniai duomenys

Tyrimo naudojami 1951–2020 metų meteorologinių matavimų duomenys. Dirvožemio drėgmės modeliavimo procese naudojami 6 meteorologijos stočių duomenys (2.4 pav.), o bendrame hidrometeorologinių sąlygų pasiskirstymo ir pokyčių 1951–2020 metais Lietuvoje vertinime – 18 meteorologijos stočių duomenys (2.6 pav.). Dotnuvoje matavimų laikotarpis apima nuo 1963 metų, Dūkšte – nuo 1972 metų.

Meteorologiniai duomenys naudojami išmatuotos dirvožemio drėgmės duomenų kokybės analizei, SWAP modelio įvesčiai, meteorologinėms ir ekstremalioms sąlygoms, jų pokyčiams vertinti ir klimato prognozėms sudaryti.



2.6 pav. Meteorologijos stotys, kuriose išmatuoti meteorologiniai duomenys naudojami disertaciniame darbe.

Tyrimė naudojami šie kiekvieną tiriamo laikotarpio dieną išmatuoti meteorologiniai rodikliai:

- vidutinė paros oro temperatūra (T_{vid} , °C),
- minimali paros oro temperatūra (T_{min} , °C),
- maksimali paros oro temperatūra (T_{max} , °C),
- kritulių kiekis per parą (P , mm).

2.3. Meteorologinių ir dirvožemio drėgmės sąlygų analizė ir vertinimas

Vidutinių sąlygų ir pokyčių analizė. 18-os meteorologijos stočių duomenys 1951–2020 metais sausio–gruodžio mėnesiais buvo naudojami vertinant bendras oro temperatūros ir kritulių kiekio sąlygas ir jų pokyčius Lietuvoje. Dirvožemio drėgmės sąlygos ir pokyčiai buvo analizuojami pagal SWAP modelio dirvožemio drėgmę 6 meteorologijos stotyse, kuriose atliktas modelio kalibravimas ir validavimas.

Dotnuvoje duomenys prieinami nuo 1963, o Dūkšte – nuo 1982 metų, todėl šių stočių analizuojamas laikotarpis yra trumpesnis. Pokyčiai įvertinti naudojant Seno (Sen) regresijos kreivę, o statistinis pokyčių reikšmingumas įvertintas naudojant Mano-Kendalo (Mann-Kendall) testą. Statistiškai reikšmingais pokyčiais laikyti tie, kai Mano-Kendalo testo statistikos reikšmės tikimybė p mažesnė nei 0,05. Tai atlikta įvertinant bendrą Lietuvos hidrometeorologinių sąlygų režimą ir pokyčius.

Vertinant, kokie meteorologiniai parametrai turi didžiausią poveikį modeliuotai dirvožemio drėgmei, buvo skaičiuojamas Pirsono (Pearson) tiesinės koreliacijos ryšys r tarp kasdieninės sumodeliuotos dirvožemio drėgmės ir prieš tai buvusių šių meteorologinių sąlygų:

- vidutinės 1, 3, 5, 10, 20, 30, 40, 50 ir 60 dienų vidutinės oro temperatūros,
- kritulių kiekio sumos už 1, 3, 5, 10, 20, 30, 40, 50 ir 60 dienų laikotarpius,
- kasdienių TPI_{d10} , TPI_{d20} , TPI_{d30} (pagal (4) lygtį) reikšmių,
- TPI_{15} (15 dienų TPI_{d30} vidurkis) ir TPI_{30} (30 dienų TPI_{d30} vidurkis) reikšmių.

Gausių kritulių poveikio dirvožemio drėgmei analizė. Naudojant gausių kritulių, kai per parą iškrito bent 10 mm, duomenis įvertinta, kaip pasikeitė dirvožemio drėgmė atsižvelgiant į kritulių kiekį ir prieš kritulius buvusią dirvožemio drėgmę. Vertinant, kaip dirvožemio drėgmės kiekis pasikeičia priklausomai nuo iškritusio gausaus kritulių kiekio, sudaryta antro laipsnio polinominė funkcija pagal (2) lygtį:

$$SM_x = a + SM_{x-1} \times b + SM_{x-1}^2 \times c, \quad (2)$$

čia SM_x – dirvožemio drėgmės pokytis (mm); SM_{x-1} – dirvožemio drėgmės kiekis prieš gausius kritulius (mm); koeficientai a , b , c (1 priedas).

Laikotarpių be kritulių poveikio dirvožemio drėgmei analizė. Siekiant įvertinti dirvožemio drėgmės pokyčių greitį nelietingų laikotarpių metu priklausomai nuo prieš tai buvusios drėgmės, buvo atrinkti atvejai, kai kritulių neiškrito (0 mm kritulių kiekis per parą) 3–10 dienų iš eilės. Ryšį apibūdinantys regresijos koeficientai pateikti 2 priede.

Analizuojant, kaip šiltojo sezono atskirų gegužės–spalio mėnesių dirvožemio drėgmė priklauso nuo to paties mėnesio oro temperatūros ir kritulių kiekio atskirai priesmėlinguose ir priemolinguose dirvožemiuose, buvo sudarytos daugianarės regresijos lygtis, pagal kurią apskaičiuota prognozuojama drėgmė:

$$SM_p = z + P \times a + T_{vid} \times b, \quad (3)$$

čia SM_p – vidutinė mėnesio dirvožemio drėgmė (mm); P – kritulių kiekis per mėnesį (mm); T_{vid} – vidutinė mėnesio oro temperatūra (°C); regresijos koeficientai z , a , b (4 priedas).

Sausrų pagal TPI išskyrimas ir drėgmės vertinimas. Temperatūros ir kritulių indeksas TPI yra šiuo metu Lietuvoje galiojantis oficialus rodiklis pavojingai sausrai (Lietuvos hidrometeorologijos..., 2020), stichinei sausrai (Lietuvos Respublikos..., 2020) identifikuoti ir skelbti. TPI indeksas parodo santykį tarp kritulių (drėkinimo sąlygų) ir oro temperatūros (potencialių garavimo sąlygų) (Nacionalinė mokėjimo..., 2019). Kasdieninės TPI indekso reikšmės, skirtos sausrai identifikuoti, apskaičiuotos pagal prieš tai buvusias 30 parų meteorologines sąlygas ($n = 30$) (toliau – TPI_{d30}) pagal lygtį:

$$TPI_{dn} = P_n / T_{vidn} \times 100, \quad (4)$$

čia n – parų skaičius; P_n – n parų kritulių kiekis (mm); T_{vidn} – n parų vidutinės paros oro temperatūros suma ($^{\circ}C$).

Vertinant drėgmės ir įvairių laikotarpių meteorologinių sąlygų ryšį, taip pat vertintos 10 (TPI_{d10}) ir 20 (TPI_{d20}) dienų temperatūros ir kritulių santykis (pagal (4) lygtį).

TPI_{d30} indeksas, skirtas stichinei sausrai identifikuoti, pavasarį pradedamas skaičiuoti, kai prieš tai einančių 30 parų laikotarpio vidutinė oro temperatūra yra $5^{\circ}C$ ar aukštesnė, tačiau ne anksčiau nei kovo 1 dieną ir ne vėliau nei balandžio 15 dieną (Nacionalinė mokėjimo..., 2019). Skaičiavimas pradedamas pirmą dieną, kai 30 dienų vidutinė oro temperatūra pasiekia $5^{\circ}C$ ar daugiau, tačiau skaičiavimas nėra nutraukiamas, jeigu jau pradėjus skaičiavimą oro temperatūra laikinai sumažėja.

TPI_{d30} indekso skaičiavimas rudenį baigiasi, kai 30 parų laikotarpio vidutinė oro temperatūra yra žemesnė negu $5^{\circ}C$, tačiau ne vėliau nei spalio 31 dieną.

Pavojingas meteorologinis reiškiny – *sausringas laikotarpis augalų vegetacijos laikotarpiu* (toliau – *pavojinga sausra* arba sausra pagal TPI_{15}) registruojamas, kai TPI_{15} mažesnis nei 3,5 (Lietuvos hidrometeorologijos..., 2020). Stichinis meteorologinis reiškiny – *sausra augalų vegetacijos laikotarpiu* (toliau – *stichinė sausra* arba sausra pagal TPI_{30}) registruojamas, kai TPI_{30} mažesnis nei 3,5 (Lietuvos Respublikos... 2020).

Tyrime analizuojamas išskirtų TPI_{15} ir TPI_{30} sausrų pasikartojimo dažnis ir pasikartojimas per sezoną, trukmė, dienų ir metų su sausra skaičius. Taip pat įvertinamos sausros metu buvusios SWAP modelio išvesties 0–20 cm dirvožemio drėgmės reikšmės: pirmą reiškinio dieną buvusi drėgmė, viso reiškinio metu buvusios drėgmės mediana ir minimali reikšmė sausros metu.

Ilgo lietingo laikotarpio išskyrimas ir drėgmės vertinimas. Ilgo lietingo laikotarpio indeksas skirtas ilgai trunkantiems perteklinio drėkinimo krituliais

laikotarpiams identifikuoti. Šis indeksas Lietuvoje oficialiai taikomas nuo 2020 metų (Lietuvos Respublikos..., 2020).

Ilgį lietingi laikotarpiai skaičiuojami imant periodą nuo gegužės 1 iki spalio 31 dienos. Yra iš anksto nustatyta kiekvienos skaičiuojamos dienos ribinė ILL_{ref} reikšmė pagal lygtį:

$$ILL_{ref} = P_{60} + 2,8 \times SD, \quad (5)$$

čia P_{60} – slenkančios 60 dienų kritulių sumos 1971–2020 metais vidurkis, SD – slenkančios 60 dienų kritulių sumos 1971–2020 metais standartinis nuokrypis.

Šiame tyrime ILL_{ref} riba apskaičiuota pagal 1971–2020 metų duomenis – šis laikotarpis naudojamas oficialiai vertinant ilgą lietingą laikotarpį (Lietuvos Respublikos..., 2020). Ilgas lietingas laikotarpis nustatomas, kai praėjusių 60 dienų kritulių suma (P_{60} , pagal (5) lygtį) pasiekia arba viršija ILL_{ref} .

Remiantis tokia metodika išskirti ilgi lietingi laikotarpiai 1951–2020 metais 6 meteorologijos stotyse. Tyrime analizuojamas išskirtų ilgų lietingų laikotarpių pasikartojimo dažnis ir pasikartojimas per sezoną, trukmė, dienų ir metų su reiškiniumi skaičius.

Norint apibrėžti dirvožemio drėgmės reikšmių kintamumą sausros arba ilgo lietingo laikotarpio metu, buvo vertinamos reiškinio metu buvusios sumodeliuotos 0–20 cm dirvožemio drėgmės reikšmės: pirmą reiškinio dieną buvusi drėgmė, viso reiškinio metu buvusios drėgmės mediana ir maksimali reikšmė.

Sausų ir drėgnų periodų dirvožemyje identifikavimas. Tyrimo metu nustatyta, kad TPI30 sausrų ir ilgų lietingų laikotarpių metu buvusi drėgmė yra artima atitinkamai 10-to ir 90-to dirvožemio drėgmės skirstinių procentilio reikšmėms. Remiantis tuo sausi ir drėgni periodai dirvožemyje (šie terminai toliau tyrime vartojami įvardijant ekstremaliai sausas ir drėgnas sąlygas pagal dirvožemio drėgmę) išskirti atitinkamai naudojant 5-tą ir 10-tą (sausoms) bei 90-tą ir 95-tą (drėgnoms sąlygoms dirvožemyje) procentilių reikšmes. Kiekvieną gegužės 1–spalio 31 laikotarpio dieną procentilių ribos nustatytos pagal kasdieninę atitinkamo procentilio dirvožemio drėgmės vertę. Norint turėti išlygintą ribinių reikšmių kreivę, procentilių ribos nugludintos panaudojus antro laipsnio polinomine kreivę pagal lygtį:

$$Dr_{proc} = z + n^2 \times a - n \times b, \quad (6)$$

čia Dr_{proc} – skaičiuojamo procentilio dirvožemio drėgmės reikšmė (mm); n – sekos eilės numeris (pirmas – gegužės 1 dieną, paskutinis – spalio 31 dieną); z , a , b – koeficientai.

Šios kreivės, pritaikytos kiekvienam procentiliui ir naudojamos tyrime, kaip sausų ir drėgnų periodų dirvožemyje išskyrimo ribos atskirai kiekvienai stočiai (3.26 pav.).

Sausi periodai dirvožemyje išskiriami, kai 10 dienų dirvožemio drėgmės vidurkis pasiekia arba nukrinta žemiau 5-to ir 10-to procentilio ribos. Drėgni periodai – kai pasiekia ar viršija 90-to ir 95-to procentilio vertę.

Siekiant nustatyti, kokios meteorologinės sąlygos nulemia sauso ar drėgno periodo pradžią, buvo atliekama koreliacinė analizė ir įvertintas ryšys tarp pirmos sauso, drėgno periodo dieną buvusios dirvožemio drėgmės reikšmių bei prieš tai buvusios vidutinės oro temperatūros, kritulių kiekio sumos per 1, 3, 5, 10, 20, 30, 40, 50 ir 60 dienų laikotarpius ir kasdienių TPI_{d10}, TPI_{d20}, TPI_{d30}, TPI15 ir TPI30 reikšmių.

Sausų ir drėgnų periodų dirvožemyje poveikio žemės ūkio augalų derlingumui analizė. Žemės ūkio augalų derlingumo duomenys naudojami siekiant įvertinti, kaip dirvožemio drėgmė galėjo lemti derliaus anomalijas. Pradiniai derlingumo duomenys paimti iš Lietuvos statistikos departamento duomenų archyvo (<https://osp.stat.gov.lt>).

Tyrime naudojami apibendrinti žieminių javų (žieminių kviečių, žieminių kvietrugių, žieminių rugių, žieminių miežių) ir vasarinių javų (vasarinių kviečių, vasarinių miežių, vasarinių kvietrugių, vasarinių rugių, avižų, grikių, varpinių mišinių, kukurūzų), šakniavaisių (bulvių ir cukrinių runkelių) derlingumo (t/ha) duomenys 2000–2020 metais. Šios dvi kategorijos pasirinktos todėl, jog yra vyraujančios Lietuvoje ir apibūdina dvi žemės ūkyje auginamų augalų rūšis (Lietuvos statistikos..., 2020). Gauti kiekvienos analizuojamos stoties savivaldybės derlingumo duomenys.

Derlingumo duomenyse yra fiksuojamas teigiamas derlingumo trendas (3.37 pav.), kuris gali būti nulemtas naujų veislių auginimo, žemės ūkio praktikos ir technologijų kaitos.

Todėl tam, kad galima būtų išskirti derlingumo anomalijas atskirais metais, pirmiausia iš derlingumo duomenų buvo eliminuotas tiesinis trendas.

Tyrime derlingumo anomalijos yra išskiriamos naudojant standartizuotas derlingumo reikšmes:

$$d_{st} = (d_d - d_{dvid}) / d_{sd}, \quad (7)$$

čia d_d – detrendizuota derlingumo reikšmė (t/ha); d_{dvid} – aritmetinis visos d_d reikšmių sekos vidurkis (t/ha); d_{sd} – standartinis visos d_d reikšmių sekos nuokrypis (t/ha).

Toks metodas leidžia išskirti ir nesunkiai interpretuoti anomalijas. Stipriomis anomalijos laikomos tos, kurių standartizuotos reikšmės $d_{st} \leq -1$ (stipri neigiama anomalija) arba $\geq +1$ (stipri teigiama anomalija).

2.4. Palydovinių dirvožemio drėgmės reikšmių palyginimas su SWAP modeliuota drėgme

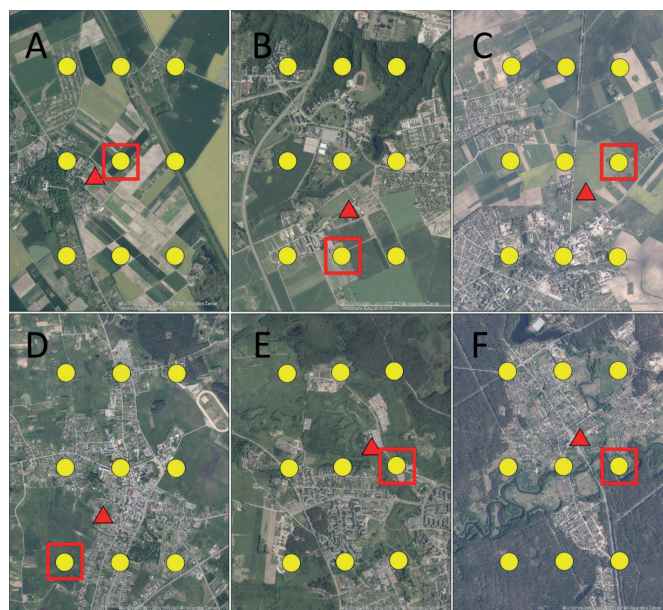
Siekiant nustatyti palydovinių duomenų panaudojimo galimybes vertinti dirvožemio drėgmę, SWAP modeliu sumodeliuota dirvožemio drėgmė palyginta su dviem palydoviniais dirvožemio drėgmės produktais: „Copernicus“ SSM ir ESA CCI SM, kurie skiriasi tiek savo skiriamąja geba, tiek laiko aprėptimi.

„Copernicus“ paviršiaus dirvožemio drėgmės produktas (SSM). Įvairių palydoviniais metodais išmatuotų paviršiaus produktų informacija Žemės stebėsenos sistemoje „Copernicus“ (<https://land.copernicus.eu/>) pradėta tiekti nuo 2013 metų. Sukurti produktai skirti įvairių biologinių ir geofizinių žemės paviršiaus parametrų, pavyzdžiui, augalijos būklės, sausumos vandens, sausumos kriosferos (ežerų ledo, sniego), parametrų stebėsenai. Vienas iš produktų yra paviršiaus dirvožemio drėgmė (SSM, angl. *Surface Soil Moisture*), išmatuota sintetinės apertūros radaru (SAR) palydove „Sentinel-1“. Produktas yra 1 km ($1^\circ/112$) skiriamosios gebos ir 1 dienos laiko žingsnio (Bauer-Marschallinger ir Paulik, 2019). Misijos „Sentinel-1“ palydovų („Sentinel-1A“ ir „Sentinel-1B“) pagrindinė paskirtis pateikti įvairių hidrometeorologinių parametrų reikšmes C mikrobangų juostos diapazonu. Pagrindiniu darbinio režimu veikiančio radaro aprėptis itin didelė – apie 250 km pločio. Pradinių duomenų skiriamoji geba siekia 20 m, tačiau galutinio dirvožemio drėgmės produkto SSM skiriamoji geba apdorojus duomenis siekia 1 km (Bauer-Marschallinger ir Paulik, 2018). SSM produktas prieinamas nuo 2014 metų spalio, todėl tyrime naudojami duomenys nuo 2015 metų.

Šiame tyrime kiekvienai analizuojamai stočiai priskirta SSM produkto gardelė. Gardelės atranka atlikta vertinant SWAP modelio dirvožemio drėgmės ryšį su artimiausiomis devyniomis gardelėmis. Nustatius, kad Pirsono tiesinės koreliacijos ryšiai su visomis gardelėmis yra panašūs (2.4 lentelė), stočiai priskirta artimiausia gardelė, kurioje vyrauja kiek įmanoma mažiau urbanizuota aplinka (2.7 pav.) Pažymėtina, kad dalis parinktos gardelės dėl 1 km siekiančios raiškos vis tiek gali apimti ir kai kurias gyvenamąsias teritorijas.

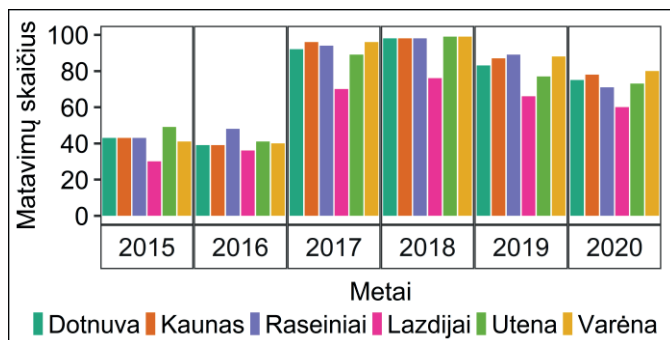
2.4 lentelė. Pirsono tiesinės koreliacijos koeficientas (r) tarp SWAP modelio dirvožemio drėgmės ir SSM drėgmės produkto reikšmių. Geltonai – pasirinktų gardelių ryšiai r . Pateikta gardelių schema skirta 2.7 pav. gardelėms identifikuoti.

| Stotis | G1 | G2 | G3 | G4 | G5 | G6 | G7 | G8 | G9 | Gardelių schema |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------------|
| Dotnuva | 0,53 | 0,55 | 0,50 | 0,52 | 0,56 | 0,55 | 0,51 | 0,56 | 0,59 | |
| Kaunas | 0,50 | 0,54 | 0,52 | 0,40 | 0,46 | 0,51 | 0,34 | 0,36 | 0,37 | |
| Raseiniai | 0,51 | 0,50 | 0,50 | 0,54 | 0,52 | 0,51 | 0,59 | 0,60 | 0,59 | |
| Lazdijai | 0,44 | 0,39 | 0,37 | 0,44 | 0,40 | 0,39 | 0,47 | 0,37 | 0,35 | |
| Utena | 0,55 | 0,51 | 0,49 | 0,55 | 0,49 | 0,46 | 0,51 | 0,38 | 0,27 | |
| Varėna | 0,12 | 0,12 | 0,09 | 0,21 | 0,28 | 0,24 | 0,18 | 0,28 | 0,28 | |



2.7 pav. „Copernicus“ dirvožemio drėgmės produkto gardelės (geltoni taškai), esančios arčiausiai Dotnuvos (A), Kauno (B), Raseinių (C), Lazdijų (D), Utenos (E), Varėnos (F) meteorologijos stočių (raudonas trikampis) bei analizėje naudojama gardelė (raudonas kvadratas).

Analizuojant SSM dirvožemio drėgmę nustatyta, kad 2015–2016 metai išsiskiria iš likusių analizuojamo laikotarpio metų. 2015 metais pradėtas teikti SSM drėgmės produktas tik pagal palydovą „Sentinel-1A“, paleistą 2015 metais, todėl matavimų skaičius pasirinktose gardelėse buvo mažesnis (po 30–50 matavimų per analizuojamą sezoną, kas 3–8 dienas) (2.8 pav.).



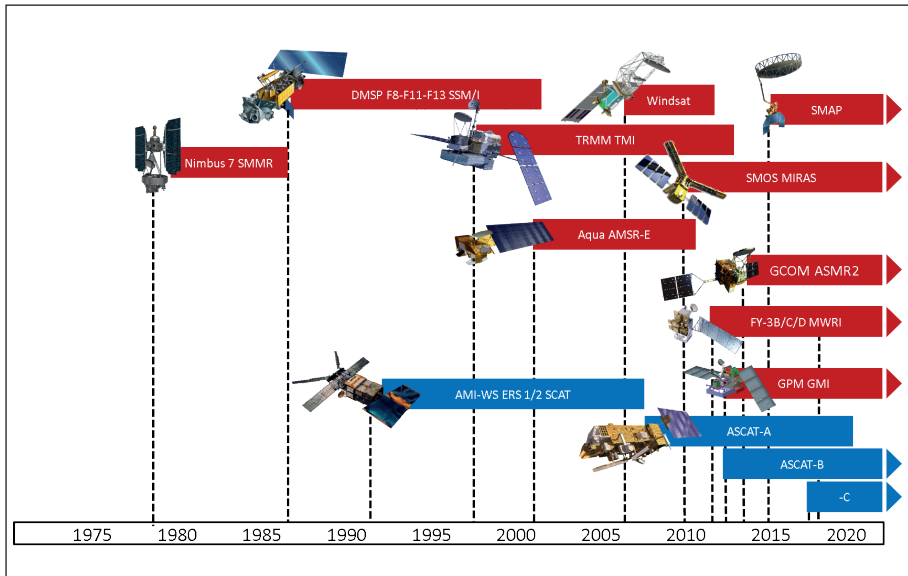
2.8 pav. Palydovinės dirvožemio drėgmės SSM duomenų skaičius stotims priskirtose gardelėse 2015–2020 metais.

2016 metais, paleidus palydovą „Sentinel-1B“, matavimų skaičius nuo 2017 metų padažnėjo (Bauer-Marschallinger ir Paulik, 2019). Dėl duomenų nehomogeniškumo ir duomenų aprašyme pateiktos rekomendacijos (Bauer-Marschallinger ir Massart, 2022), šiame tyrime naudojami 2017–2020 metų gegužės–spalio mėnesių SSM drėgmės duomenys.

Palydovu išmatuota dirvožemio drėgmė (%) apima viršutinį 5 cm dirvožemio sluoksnį, todėl lyginant palydovinius ir SWAP modelio duomenis naudojama sumodeliuota viršutinio 5 cm sluoksnio dirvožemio drėgmė.

Europos kosmoso agentūros dirvožemio drėgmės produktas (ESA CCI SM). Europos kosmoso agentūra (ESA, angl. *European Space Agency*) įgyvendina svarbiausių klimato rodiklių stebėsenos (ECV) programą. ESA CCI SM projektas yra jos dalis (van der Schalie ir kt., 2021). ESA CCI SM produktas sujungia pasyvių, aktyvių ir kombinuotų įvairiuose palydovuose įmontuotų jutiklių informaciją (2.9 pav.). Išsamiai ESA CCI SM projekto produktas aptartas kituose tyrimuose (Dorigo ir kt., 2017; Gruber ir kt., 2019; Preimesberger ir kt., 2021).

Projektas pradėtas 2010 metais ir bent kartą per metus pateikiama nauja ESA CCI SM produkto duomenų versija, pridedant naujausius duomenis, atnaujinant senesnius duomenis pagal patobulintus algoritmus, peržiūrint duomenų kokybę ir prijungiant papildomų palydovinių jutiklių informaciją.



2.9 pav. Įvairiuose palydovuose įmontuoti mikrobangų prietaisai (raudoni – pasyvieji, mėlyni – aktyvieji jutikliai), kuriais išmatuota dirvožemio drėgmė naudojama sukuriant ESA CCI SM produktą (versija v06.1) (van der Schalie ir kt., 2021).

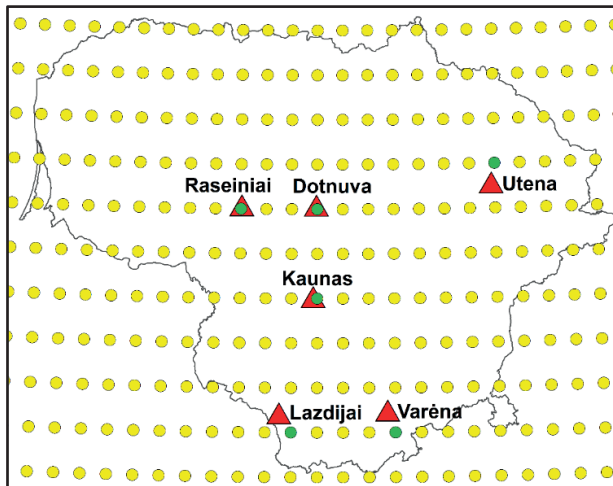
ESA CCI SM yra ilgalaikė palydovinių dirvožemio drėgmės duomenų seka: nuo 1978 metų lapkričio iki 2020 metų gruodžio (pagal v06.1 versiją) (van der Schalie ir kt., 2021). Tokių ilgalaikių ir nuolat, nors ir ne operatyviai, atnaujinamų duomenų sekų sukūrimas leidžia palydovinius duomenis plačiau panaudoti klimato tyrimuose.

ESA CCI SM dirvožemio drėgmės duomenys pateikiami $0,25^\circ$ skiriamąja geba (Scanlon ir kt., 2021). Produktas sudarytas iš trijų dalių: matavimai iš pasyviųjų, aktyviųjų jutiklių bei kombinuotas produktas, jungiantis pasyviųjų ir aktyviųjų mikrobangų jutiklių duomenis (Preimesberger ir kt., 2021).

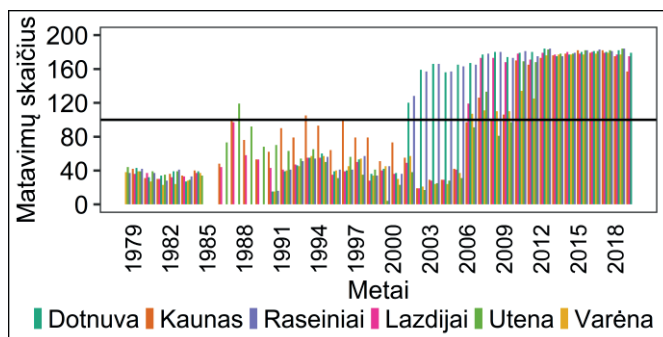
Tyrimo naudojamas kombinuotas produktas, kuris pateikia informaciją apie dirvožemio drėgmę iki 5 cm gylio, jungdamas dviejų jutiklių informaciją.

Analizuojamoms stotims parinkta ta gardelė, kurios centrinė dalis yra arčiausiai stoties (2.10 pav.). Dėl to, kad XXI amžiaus dirvožemio drėgmė buvo matuojama naudojant daugiau palydovinių jutiklių, skiriasi ir duomenų kiekis. 2.11 pav. pateiktas matavimų skaičius 1979–2020 metų gegužės–spalio mėnesiais pagal analizuojamoms stotims priskirtas artimiausias gardeles. Gardelė priskirta pagal mažiausią atstumą iki gardelės centro. Galima pastebėti, kad Raseiniuose ir Dotnuvoje nuo 2002 metų, o kitose – nuo 2008 metų, matavimų skaičius per sezoną gerokai išaugo: siekia bent 100

matavimų (beveik kas antrą dieną po matavimą) per sezoną, o analizuojamo periodo pabaigoje – apie 180 (beveik kasdien).



2.10 pav. ESA CCI dirvožemio drėgmės produkto gardelės (geltoni taškai), esančios arčiausiai meteorologijos stočių (raudonas trikampis), bei analizėje naudojama palydovinio produkto gardelė (žalias taškas).



2.11 pav. ESA CCI SM matavimų skaičius parinktose gardelėse 1979–2020 metų gegužės–spalio mėnesiais.

SWAP modeliu sumodeliuota dirvožemio drėgmė (0–5 cm, mm) lyginama su SSM (%) ir su ESA CCI SM produkto drėgme (m^3/m^3). Darbe analizuojama 2017–2020 metų SSM drėgmė, o ESA CCI SM – 1979–2020 ir 2008–2020 metais atskirai, kadangi produkto duomenų skaičiuje yra lūžis (2.11 pav.). Taip pat atliktas abiejų palydovinių produktų palyginimas sutampančiu 2017–2020 metų laikotarpiu.

2.5. Prognozuojamų klimato pokyčių poveikis dirvožemio drėgmei

Ateities klimato prognozės sudarytos remiantis tipiniais klimato scenarijais (RCP, angl. *Representative Concentration Pathways*), kurie remiasi socioekonominių veiksnių, tokių kaip gyventojų skaičius, ekonominė veikla, vartojimo įpročiai, energijos vartojimas, žemėnauda, technologijos ir klimato politika, pokyčiais (IPCC, 2014). Šie veiksniai siejami su šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekiu ir jo šiluminiu poveikiu klimatui. Šiame tyrime naudojami Klimato modelių palyginimo projekto 5 etapo (CMIP5, angl. *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*) duomenys. Iš viso sudarant klimato prognozes išskiriami keturi pagrindiniai galimos klimato kaitos scenarijai: RCP2.0, RCP4.5, RCP6.0 ir RCP 8.5 (IPCC, 2014). Skaičius prie RCP nurodo numatomą energetinį poveikį (W/m^2) klimato sistemai: kuo didesnis skaičius, tuo didesnis poveikis ir prognozuojami didesni klimato pasikeitimai.

Taikomi klimato scenarijai ir modeliai. Tyrime klimato prognozei sudaryti naudojami du klimato kaitos scenarijai: vidutinis (RCP4.5) ir pesimistinis (RCP8.5). Tyrimui pasirinkta dviejų globalios cirkuliacijos modelių (GCM) regioninė realizacija: RCA4 modelis (skiriamoji geba $0,11^\circ \times 0,11^\circ$). Buvo panaudoti šie GCM modeliai:

- MOHC-HadGEM2-ES (toliau – MOHC),
- MPI-M-MPI-ESM-LR (toliau – MPI).

MOHC ir MPI yra dažnai tyrimuose taikomi sudarant klimato kaitos projekcijas (Yang ir kt., 2022; Katavoutas ir kt., 2022; Stonevičius ir kt., 2018). Kadangi RCA4 ribinės sąlygos apibrėžiamos dviem globaliais modeliais, ribinės sąlygos iš esmės yra skirtingos (Katavoutas ir kt., 2022).

Meteorologinių rodiklių prognozės sudarymas. Prognostiniai meteorologinių rodiklių (vidutinė, minimali ir maksimali paros oro temperatūra, paros kritulių kiekis) duomenys įkelti į WCRP CORDEX duomenų bazę (<https://esgf-data.dkrz.de/search/cordex-dkrz/>), juos atsisiuntus ištraukiami ir apdorojami pradiniai duomenys, susiję su atskirois gardelėmis, apimančiomis analizuojamų meteorologijos stočių vietas.

MOHC ir MPI modelių atskaitos laikotarpis apima 1970–2005 metus, todėl jis taikomas kiekvieno modelio išvesties duomenims palyginti su meteorologijos stotyse fiksuotomis reikšmėmis. Apskaičiuotas vidutinis minimalios, maksimalios ir vidutinės oro temperatūros skirtumas ir kritulių santykis tarp modelio išvesties duomenų ir išmatuotų reikšmių 1970–2005 metais buvo naudotas prognostinių duomenų (2020–2099 metais) korekcijai.

Dirvožemio drėgmės prognozės sudarymas. Prognozuojant dirvožemio drėgmę iki XXI amžiaus pabaigos, dirvožemio drėgmės modeliavimas su SWAP modeliu atliktas naudojant modelio parametrus, kalibravimo metu pritaikytus tiriamoms meteorologijos stotims. SWAP modelio meteorologiniai įvesties duomenys – prognostiniai oro temperatūros ir kritulių duomenys pagal MOHC ir MPI modelio realizacijas ir du scenarijus 1970–2005 metams (praeities sąlygų) ir 2020–2099 metams (ateities).

Pokyčių vertinimas. Tyrimo metu buvo įvertintas pokytis šių rodiklių:

- vidutinės oro temperatūros,
- kritulių kiekio,
- dirvožemio drėgmės,
- dienų su TPI15 ir TPI30 sausromis pasikartojimo,
- dienų su ilgu lietingu laikotarpiu pasikartojimo,
- dienų su sausu periodu dirvožemyje skaičiaus,
- dienų su drėgnu periodu dirvožemyje skaičiaus.

Apskaičiuotos vidutinės šių rodiklių 1970–2005 metais ir dvidešimtmečiais iki XXI amžiaus pabaigos (2020–2039, 2040–2059, 2060–2079 ir 2080–2099 metais) sąlygos. Visų pokyčių ateityje statistinis reikšmingumas vertinamas pagal neparametrinį Mano-Vitnio-Vilkoksono (Mann–Whitney–Wilcoxon) rangų sumos kriterijų (imtys statistiškai reikšmingai skiriasi, kai $p < 0,05$).

3. REZULTATAI

3.1. SWAP modelio tinkamumo dirvožemio drėgmės tyrimams vertinimas

Šiame poskyryje analizuojamas išmatuotų 0–20 cm dirvožemio sluoksnio drėgmės ir SWAP modeliu sumodeliuotų reikšmių glaudumas. Kalibravimo metu modelio parametrai buvo parenkami vertinant vidutinę kvadratinę paklaidą (RMSE) ir determinacijos koeficientą (R^2) tarp matavimo ir modelio išvesties duomenų. Dirvožemio drėgmės modeliavimas SWAP modeliu atliktas dienos laiko žingsniu.

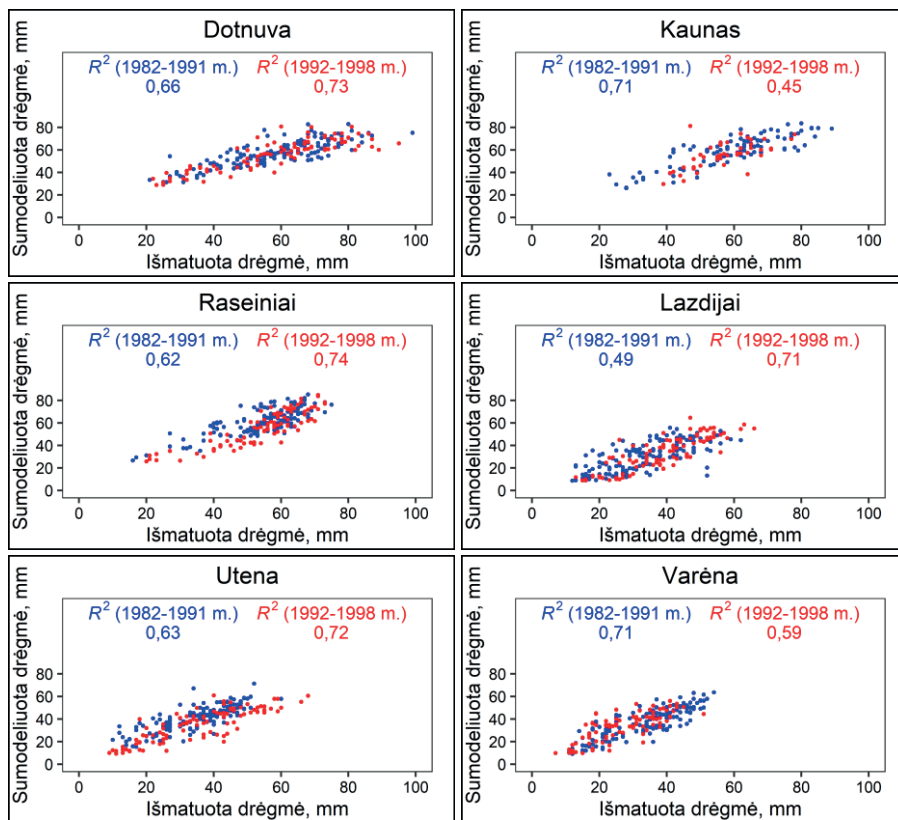
Kalibravimo laikotarpiu (1982–1991 metais) analizuojamose stotyse vidutinės RMSE reikšmės kito nuo 8,1 Varėnoje iki 10,4 mm Raseiniuose (3.1 lentelė, 3.1 pav.). Raseiniuose ir Lazdijuose kalibravimo laikotarpiu didžiausią dalį metų (44 ir 40 %) RMSE viršijo 10 mm (3.1 lentelė, 3.1 pav.).

3.1 lentelė. Kalibravimo ir validavimo laikotarpiais gegužės–rugsėjo mėnesiais išmatuotos (MAT., mm) ir sumodeliuotos (MOD., mm) 0–20 cm dirvožemio sluoksnio drėgmės vidurkis, vidutinė paklaida (ME, mm), vidutinė paklaida procentais (ME%, %), vidutinė kvadratinė paklaida (RMSE, mm), metų, kai $RMSE \geq 10$, skaičius (% nuo visų metų skaičiaus), determinacijos koeficientas (R^2) ir Pirsono tiesinės koreliacijos koeficientas (r) tarp sumodeliuotų ir išmatuotų reikšmių. Visi r statistiškai reikšmingi ($p < 0,05$).

| Stotis (metų skaičius) | MAT. | MOD. | ME | ME% | RMSE | RMSE \geq 10 | R^2 | r |
|---|------|------|------|-------|------|----------------|-------|------|
| Kalibravimo laikotarpis (1982–1991 metai) | | | | | | | | |
| Dotnuva (10) | 58,2 | 57,0 | -1,2 | -2,1 | 9,0 | 20 | 0,67 | 0,82 |
| Kaunas (7) | 59,1 | 58,9 | -0,2 | -0,3 | 8,2 | 0 | 0,71 | 0,84 |
| Raseiniai (9) | 54,6 | 61,7 | 7,1 | 13,0 | 10,4 | 44 | 0,62 | 0,79 |
| Lazdijai (10) | 33,1 | 30,1 | -3,0 | -9,1 | 9,8 | 40 | 0,49 | 0,70 |
| Utena (10) | 34,3 | 40,8 | 6,5 | 19,0 | 9,3 | 30 | 0,62 | 0,79 |
| Varėna (10) | 33,4 | 37,1 | 3,7 | 11,1 | 8,1 | 10 | 0,71 | 0,84 |
| Validavimo laikotarpis (1992–1998 metai) | | | | | | | | |
| Dotnuva (7) | 58,1 | 55,9 | -2,2 | -3,8 | 9,9 | 43 | 0,72 | 0,85 |
| Kaunas (3) | 57,1 | 55,5 | -1,6 | -2,8 | 9,0 | 0 | 0,45 | 0,67 |
| Raseiniai (7) | 54,8 | 56,4 | 1,6 | 2,9 | 7,7 | 0 | 0,74 | 0,86 |
| Lazdijai (7) | 38,9 | 33,6 | -5,3 | -13,6 | 9,6 | 43 | 0,71 | 0,84 |
| Utena (7) | 35,4 | 34,9 | -0,5 | -1,4 | 8,0 | 29 | 0,72 | 0,85 |
| Varėna (6) | 27,5 | 33,7 | 6,2 | 22,5 | 10,1 | 33 | 0,59 | 0,77 |

Determinacijos koeficientas R^2 tarp išmatuotų ir sumodeliuotų drėgmės reikšmių stotyse siekė 0,49–0,71. Mažiausias R^2 fiksuotas Lazdijuose ir tai gali būti susiję su pavieniais 1982 metais, kai sezono viduryje skirtumai tarp modelio ir drėgmės matavimų buvo itin dideli (3.3 pav.).

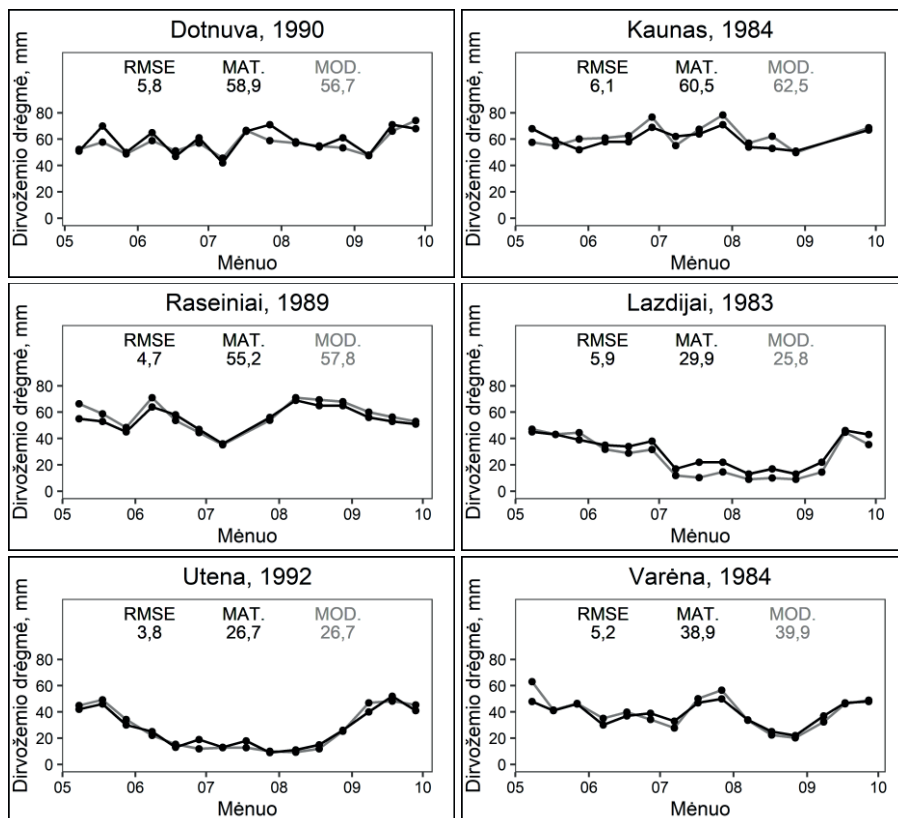
Validavimo laikotarpiu (1992–1998 metais) RMSE yra artimas kalibravimo laikotarpio reikšmėms (nuo 7,7 iki 10,1 mm). RMSE mažiausias Raseiniuose bei Utenoje. Tik Varėnoje šis dydis viršija 10 mm (3.1 lentelė, 3.1 pav.). R^2 validavimo laikotarpiu tarp išmatuotų ir sumodeliuotų dydžių tiriamose vietose varijuoja nuo 0,45 iki 0,74.



3.1 pav. Ryšys tarp išmatuotos ir sumodeliuotos 0–20 cm dirvožemio sluoksnio drėgmės kalibravimo (1982–1991 metai, mėlyni taškai) ir validavimo (1992–1998 metai, raudoni taškai) laikotarpiais gegužės–rugsėjo mėnesiais skirtingose stotyse.

Tai, kad validavimo ir kalibravimo laikotarpiais RMSE dydis stotyse yra panašus, reiškia, kad modelio kalibravimo metu parinkti parametrai pagal

1982–1991 metus yra tinkami ir 1992–1998 metų laikotarpiui. Kalibravimo ir validavimo laikotarpiu Pirsono tiesinės koreliacijos koeficientas r atskirose stotyse siekia 0,67–0,86. Šie rezultatai yra artimi kitiems su SWAP modeliu atliktiems tyrimams. Koreliacinis ryšys tarp SWAP modelio ir išmatuotos drėgmės, priklausomai nuo kalibravimo ir validavimo laikotarpio, tam naudotų išmatuotų duomenų bei vietovės, kituose tyrimuose siekia 0,74–0,96 (Kim ir kt., 2015; Ma ir kt., 2011; Martinez-Ferri ir kt., 2013; Taparauskienė, ir Heng, 2008).

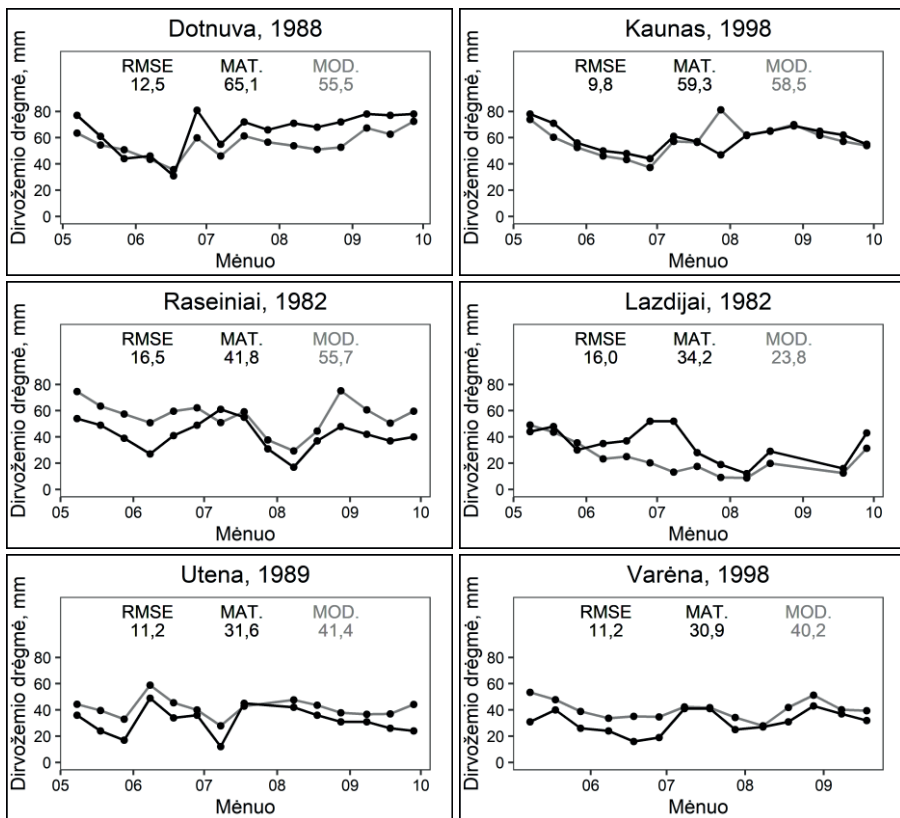


3.2 pav. Išmatuota (juoda kreivė) ir sumodeliuota (pilka kreivė) 0–20 cm dirvožemio sluoksnio drėgmė tais metais, kai matavimų ir modelio drėgmės duomenų skirtumo vidutinės kvadratinės paklaidos (RMSE) reikšmė yra mažiausia. MAT. – matavimo reikšmių vidurkis (mm), MOD. – modelio reikšmių vidurkis (mm).

Atskirais metais stotyse RMSE gali labai skirtis. Mažiausia RMSE reikšmė fiksuota Utenoje 1992 metais (3,8 mm), kada viso sezono išmatuotos ir modeliuotos dirvožemio drėgmės vidurkis buvo vienodas (26,7 mm). Kitose

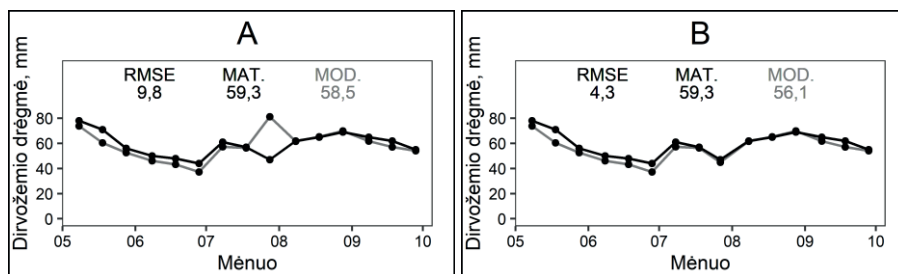
stotyse mažiausia RMSE reikšmė fiksuota nuo 4,7 iki 5,9 mm (3.2 pav.). Didžiausia RMSE užfiksuota 1982 metais Raseiniuose (16,5 mm) ir 1982 metais Lazdijuose (16,0 mm). Kitose stotyse svyruoja apie 10 mm (9,8–11,2 mm) (3.3 pav.).

Atskirų metų RMSE skirtumus (3.2 pav., 3.3 pav.) tarp stočių galima būtų sieti su dirvožemio drėgmės matavimo specifika. Matavimai buvo atliekami pastoviuose matavimų laukeliuose ir atskirais metais tie laukeliai galėjo skirtis, o modeliavimas atliekamas naudojant nekintančius dirvožemio rodiklius. Ryšys tarp matavimo ir modeliavimo drėgmės negali būti idealus, nes yra nulemiamas ne tik modelio tinkamumo, bet ir drėgmės matavimų tikslumo.



3.3 pav. Išmatuota (juoda kreivė) ir sumodeliuota (pilka kreivė) 0–20 cm dirvožemio sluoksnio drėgmė metais, kai matavimo ir modelio drėgmės skirtumo vidutinės kvadratinės paklaidos (RMSE, mm) reikšmė yra didžiausia. MAT. – matavimo vidurkis (mm), MOD. – modelio vidurkis (mm).

Išmatuotos ir sumodeliuotos dirvožemio drėgmės reikšmės gali skirtis dėl matavimų arba pateikiamų duomenų archyvuose netikslumų. Pavyzdžiui, Kaune 1998 metų liepos 28 dieną išmatuota dirvožemio drėgmė 0–20 cm siekė 47 mm, o sumodeliuota – 81,2 mm (3.4 pav.), nors 10 dienų prieš ir po liepos 28-tos dienos tiek matavimų, tiek modelio drėgmės reikšmės buvo artimos. Nustatyta, kad tądien nuo ryto iki vakaro lijo, dėl to modelio dirvožemio drėgmė išaugo, palyginti su diena prieš tai. Tikėtina, kad toks skirtumas susidarė dėl to, kad matavimas buvo atliktas arba viena diena anksčiau, arba dar prieš lietų ryte, nes lyjant dirvožemio mėginiai neimami (Lietuvos hidrometeorologijos..., 1998). Nors liepos 28 dienos dirvožemio drėgmės matavimo ir liepos 27 dienos modelio drėgmės reikšmės yra artimos (atitinkamai 47 mm ir 45 mm (3.4 pav.). Šiuo atveju skirtumai gali būti susidarę dėl netikslaus matavimo laiko užrašymo (be tikslios valandos) agrometeorologijos archyve ir visos paros kritulių kiekio modelyje naudojimo, todėl drėgmės reikšmė modelyje skaičiuojama vertinant visos paros kritulių kiekį.



3.4 pav. Išmatuota (juoda kreivė) ir sumodeliuota (pilka kreivė) 0–20 cm dirvožemio sluoksnio drėgmė 1998 metų gegužės–rugsėjo mėnesiais, kai naudojama liepos 28 dienos modelio drėgmė (A) ir kai naudojama liepos 27 dienos modelio drėgmė (B). RMSE – vidutinė kvadratinė paklaida (mm), MAT. – matavimo vidurkis (mm), MOD. – modelio vidurkis (mm).

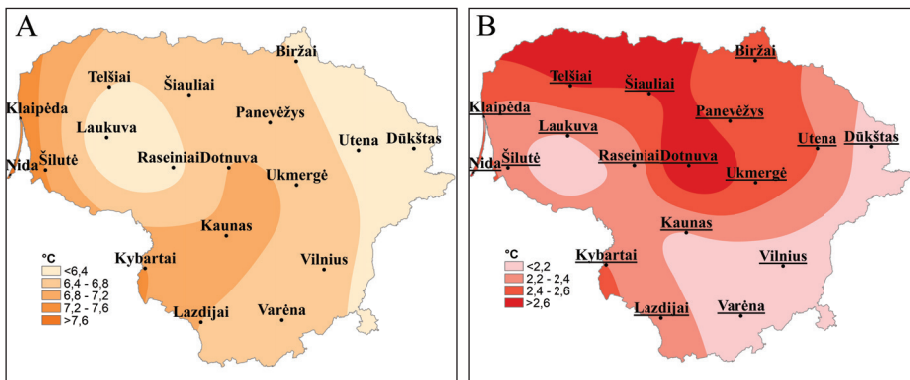
Apibendrinant 3 skyriaus rezultatus galima teigti, kad tiek kalibravimo, tiek validavimo laikotarpiu modeliavimo rezultatai yra artimi matavimų duomenims. Be to, kalibravimo ir validavimo rezultatai artimi kitų tyrimų SWAP modeliu rezultatams. Dėl to skirtingiems taškams sukalibruotas SWAP modelis yra tinkamas dirvožemio drėgmei modeliuoti ir analizuoti tais laikotarpiais, kai nėra dirvožemio drėgmės matavimų.

3.2. Oro temperatūra, krituliai ir dirvožemio drėgmė Lietuvoje

Šiame poskyryje analizuojama oro temperatūra, kritulių kiekis ir jų pokyčiai 1951–2020 metais visoje Lietuvos teritorijoje. Taip pat vertinamas dirvožemio drėgmės režimas ir jos pokyčiai šešiose analizuojamose meteorologijos stotyse.

3.2.1. Oro temperatūra ir kritulių kiekis

Oro temperatūra Lietuvoje. Vidutinė metinė oro temperatūra tiriamuoju laikotarpiu Lietuvoje kinta nuo 6,1–6,4 °C Žemaičių aukštumoje bei rytinėje šalies dalyje iki 7,5–7,7 °C pajūryje (3.5A pav.). Šilčiausias mėnuo visur (išskyrus Nidą, kur rugpjūtis yra 0,1 °C šiltesnis) yra liepa (16,7–18,0 °C). Didžiojoje teritorijos dalyje šalčiausias mėnuo yra sausis (-2,9 – -4,9 °C), pajūryje (Klaipėdoje ir Nidoje) vasaris (atitinkamai -2,1; -2,3 °C), o Telšiuose – ir sausio, ir vasario temperatūra vienoda (-3,8 °C).

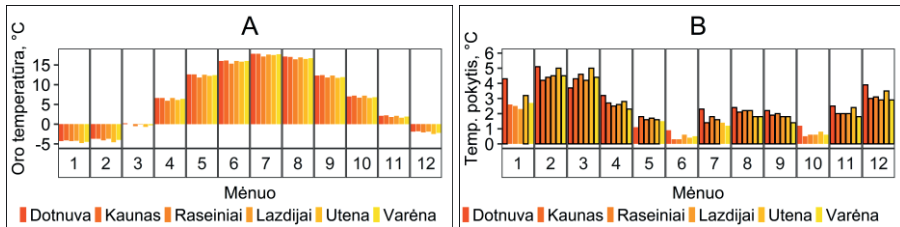


3.5 pav. Vidutinė metinė oro temperatūra (°C) (A) ir vidutinės metinės oro temperatūros pokytis (°C per 70 metų) (B) Lietuvoje 1951–2020 metais, apskaičiuotas naudojant Seno regresijos kreivę. Stočių, kuriose fiksuoti statistškai reikšmingi pokyčiai ($p < 0,05$), pavadinimai pabrūkšti.

Per analizuojamą 1951–2020 metų laikotarpį visose stotyse vidutinė metinė oro temperatūra išaugo 2,1–2,8 °C (3.5B pav.). Visi vidutinės metinės oro temperatūros pokyčiai yra statistškai reikšmingi. Daugiausia oro temperatūra išaugo šiaurinėje ir šiaurės vakarinėje dalyse, o mažiausiai – rytinėje bei pietrytinėje šalies dalyse ir Žemaičių aukštumos pietiniame pakrastyje. Didžiausi ir statistškai reikšmingi mėnesio vidutinės oro temperatūros pokyčiai fiksuoti sausio, vasario ir kovo mėnesiais (kai kur

pokyčiai siekia 4 °C). Mažiausi statistiškai nereikšmingi pokyčiai (iki 1 °C) fiksuoti gegužės, birželio ir spalio mėnesiais.

Analizuojamose šešiose meteorologinėse stotyse oro temperatūros režimas yra artimas ir pasižymi nedideliais skirtumais. Vidutinė metinė oro temperatūra 1951–2020 metais kito nuo 6,3 °C Raseiniuose ir Utenoje iki 6,9 °C Kaune (3.6A pav.).



3.6 pav. Vidutinė mėnesio oro temperatūra (°C) (A) ir vidutinės oro temperatūros (°C per 70 metų) (B) kiekvieną 1951–2020 metų mėnesį pokytis, apskaičiuotas naudojant Seno regresijos kreivę. Statistiškai reikšmingi pokyčiai ($p < 0,05$) paryškinti apvadu.

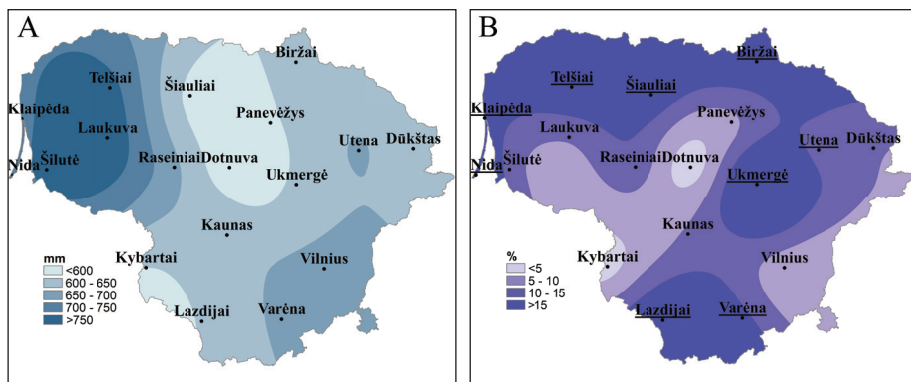
Per 1951–2020 metų laikotarpį visais mėnesiais ir visose šešiose stotyse oro temperatūra išaugo (3.6B pav.). Didžioji dalis pokyčių yra statistiškai reikšmingi ($p < 0,05$). Didžiausi pokyčiai fiksuoti šaltuoju metų laiku, ypač vasario, kovo ir gruodžio mėnesiais (2,9–5,1 °C). Mažiausi pokyčiai ir daugiausia statistiškai nereikšmingi fiksuoti birželio ir spalio mėnesiais (0,3–1,2 °C). Vertinant tik šiltąjį sezoną, daugiausia statistiškai reikšmingai oro temperatūra išaugo liepą, rugpjūtį ir rugsėjį (1,2–2,4 °C), iš kurių tik liepą Utenoje ir Varėnoje nėra reikšmingų pokyčių.

Kritulių kiekis Lietuvoje. Daugiausia kritulių per metus iškrinta Vakarų Lietuvoje Žemaičių aukštumos priešvėjinėje dalyje (767–786 mm), o mažiausiai – Lietuvos vidurio žemumos šiaurinėje dalyje ir pietvakariniame pakraštyje (iki 600 mm) (3.7A pav.). Lietingiausi mėnesiai didesnėje teritorijos dalyje yra liepa arba rugpjūtis, o vakarinėje dalyje – liepa–lapkritis, kuriais iškrinta bent 80 mm kritulių per mėnesį. Mažiausiai kritulių iškrinta trumpiausią metų mėnesį – vasarį (28–43 mm), o Vakarų Lietuvoje (Klaipėda, Nida, Laukuva, Telšiai ir Šilutė) mažiausiai kritulių iškrinta balandį (34–40 mm).

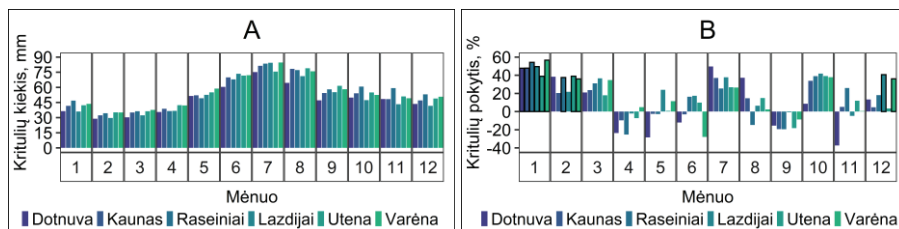
Metinis kritulių kiekis išaugo visoje teritorijoje (15–183 mm arba 3–26 %), nors ne visi pokyčiai yra statistiškai reikšmingi (3.7B pav.). Daugiausia kritulių kiekis išaugo pajūryje, šiaurinėje ir pietinėje dalyse. Nors metinis

kritulių kiekis išaugo visur, tačiau atskirais mėnesiais nustatyta statistiškai nereikšmingai mažiau kritulių. Daugiausia teigiamų ir statistiškai reikšmingų pokyčių nustatyta lapkričio–vasario mėnesiais.

Kritulių kiekis analizuojamose šešiose stotyse kinta nuo 572 mm Dotnuvoje iki 662 mm Raseiniuose. Šilčiausias mėnuo – liepa (17,1–17,8 °C), o šalčiausias – sausis (-4,1 – -4,8 °C) (3.8A pav.). Daugiausia kritulių išskrinta liepos mėnesį 75–85 mm (Utenoje rugpjūtį 79 mm), o mažiausiai – vasarį (29–35 mm).



3.7 pav. Vidutinis metinis kritulių kiekis (mm) (A) ir metinio kritulių kiekio (% per 70 metų) (B) Lietuvoje 1951–2020 metais pokytis, apskaičiuotas naudojant Seno regresijos kreivę. Stočių, kuriose fiksuoti statistiškai reikšmingi pokyčiai ($p < 0,05$), pavadinimai pabrūkinti.



3.8 pav. Vidutinis mėnesio kritulių kiekis (mm) (A) ir kritulių kiekio (% per 70 metų) (B) kiekvieną 1951–2020 metų mėnesį pokytis, apskaičiuotas naudojant Seno regresijos kreivę. Statistiškai reikšmingi pokyčiai ($p < 0,05$) paryškinti apvalu.

Kritulių kiekio pokyčiai daugiausia statistiškai nereikšmingi (3.8B pav.). Reikšmingai kritulių kiekis išaugo sausio mėnesį visose stotyse (iki 57 %), vasario mėnesį – Raseiniuose, Utenoje ir Varėnoje (apie 38 %), o gruodį – Varėnoje bei Lazdijuose (apie 39 %). Kovas, liepa ir spalvis pasižymi teigiamais kritulių kiekio pokyčiais, o balandis ir rugsėjis – neigiamais.

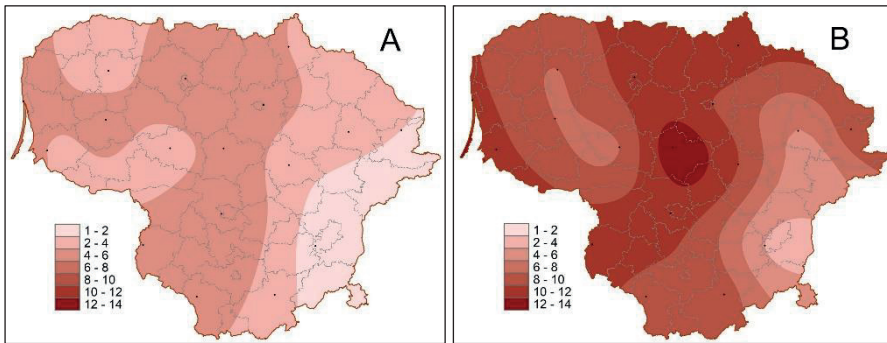
Likusiais mėnesiais pokyčių ženklas atskirose stotyse buvo skirtingas. Kritulių kiekio augimas žiemos mėnesiais, o mažėjimas vasarą ir ypač balandį nustatytas ir gretimose Lietuvai šalyse – Estijoje, Latvijoje, šiaurinėje Lenkijos dalyje (Jaagus ir kt., 2021).

3.2.2. Sausros ir lietingi laikotarpiai

Sausros. Anksčiau Lietuvoje sausroms identifikuoti taikius hidroterminį Selianinovo koeficientą (HTK) indeksas dėl savo skaičiavimo metodikos beveik neidentifikuodavo ankstyvųjų sausrų augalų vegetacijos pradžioje. Ši problema ypač išryškėjo 2018 ir 2019 metais (Rimkus ir kt., 2020). Dėl to kartu su bendraautorais atlikus tyrimą buvo pasiūlytas naujas temperatūros ir kritulių indeksas (TPI) (Nacionalinė mokėjimo..., 2019). 2020 metais TPI indeksas oficialiai Lietuvoje įteisintas nauju teisės aktu (Lietuvos Respublikos..., 2020).

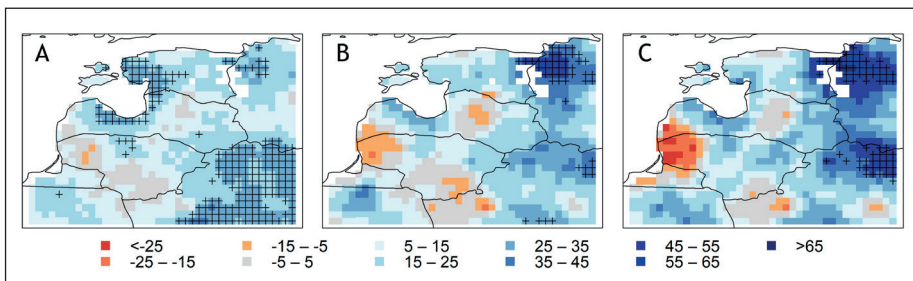
Šiuo metu taikomas TPI indeksas nėra siejamas su klimato norma ir yra tinkamas sausrai identifikuoti besikeičiančio klimato sąlygomis Lietuvoje (Rimkus ir kt., 2020).

Analizuojant įvairius sausrų identifikavimo indeksus nustatyta, kad Lietuvos sąlygomis geriau tinka temperatūros ir kritulių duomenis įtraukiantys indeksai nei tie, kuriems užtenka tik kritulių duomenų. Analizuotose 18 meteorologijos stočių TPI30 indeksas identifikavo visas (su keliomis pavienėmis išimtimis) anksčiau HTK identifikuotas sausras. Pagal HTK 1961–2019 metais buvo 16 (27 %) metų, kai bent vienoje stotyje buvo fiksuota sausra, o pagal TPI30 < 3,5 – 29 metai (47 %). Vidutiniškai sausra bent vienoje stotyje pagal HTK buvo fiksuojama kartą per 13 metų, o pagal TPI30 < 3,5 – kas 6 metus. Rytų ir pietryčių Lietuvoje per tiriamą laikotarpį pagal HTK fiksuotos 1–2 sausros, vakarinėje dalyje – 7 sausros (3.9A pav.), o pagal TPI30 < 3,5 pietryčių Lietuvoje fiksuotos mažiau nei 6 sausros, o daugiausia jų buvo vidurio Lietuvoje – 13 (3.9B pav.). Tyrimo metu nustatyta, kad didelę teritoriją apimančios sausros vyravo antroje vegetacijos sezono pusėje, o vietinio lygmens sausros dažniau buvo fiksuojamos vegetacijos sezono pradžioje (Rimkus ir kt., 2020).



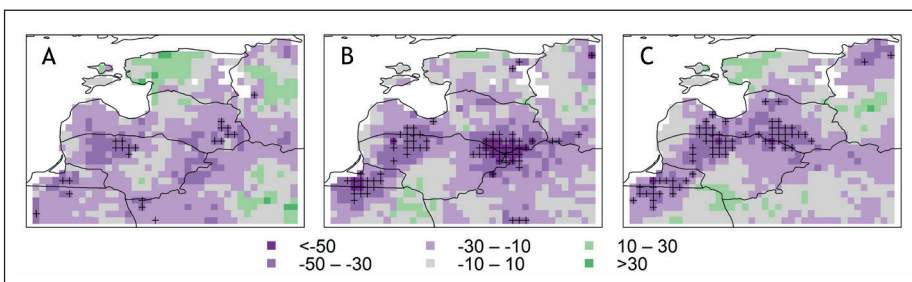
3.9 pav. Stichinių sausrų pasikartojimas Lietuvoje 1961–2019 metais pagal HTK (A) ir TPI30 < 3,5 (B) (pagal Rimkus ir kt., 2020).

Lietingi laikotarpiai. Įprastai tyrimuose daugiau dėmesio skiriama sausoms nei drėgnoms sąlygoms, tačiau dėl klimato kaitos abu ekstremumai kartojasi dažniau. Ne tik kritulių stygius, tačiau ir perteklius gali nulemti nuostolius. 2017 metų antroje pusėje ilgai trunkančio lietaus metu iškrito ypač didelis kritulių kiekis. Tokios perteklinio drėkinimo krituliais sąlygos lėmė daug nuostolių žemės ūkiui. Derlius nukentėjo ne tik dėl prastesnės kokybės, bet ir dėl to, kad žemės ūkio technika negalėjo nuimti derliaus ir paruošti laukų žieminių javų sėjai dėl užmirkusių laukų (Lietuvos Respublikos..., 2018). Tuo metu nebuvo jokio oficialiai patvirtinto indekso, kuriuo galima būtų išskirti ekstremaliai lietingą ir ilgai trunkantį laikotarpį. Dėl šios priežasties 2018 metais buvo atliktas tyrimas, kuriame kartu su bendraautoriais analizuojant įvairias alternatyvas buvo sukurta *ilgo lietingo laikotarpio* apibrėžtis ir aprašytas šio kriterijaus naudojimas (Nacionalinė mokėjimo..., 2018). Indeksas oficialiai Lietuvoje įteisintas 2020 metais nauju teisės aktu (Lietuvos Respublikos..., 2020).



3.10 pav. Maksimalaus metinio kritulių kiekio, išskrintančio per 30 (A), 60 (B) ir 90 (C) dienų, pokyčiai (mm per 70 metų) 1950–2019 metais. Statistiškai reikšmingi pokyčiai pažymėti pliuso ženklu (Mačiulytė ir kt., 2022).

Nustatyta, kad vidutinis metinis kritulių kiekis 1950–2019 metais išaugo ne tik Lietuvoje, bet ir visame rytiniame Baltijos jūros regione, nors tik šiaurės rytuose pokyčiai statistiškai reikšmingi. Maksimalus metinis kritulių kiekis per 30, 60, 90 dienų išaugo didžiojoje teritorijos dalyje, o statistiškai reikšmingi pokyčiai dažniausiai fiksuoti rytinėje tiriamos teritorijos dalyje. Lietuvoje statistiškai reikšmingi teigiami pokyčiai užfiksuoti tik nedidelėje šiaurės Lietuvos dalyje analizuojant maksimalius 30 dienų kritulius (3.10 pav.). Vakarų Lietuva išsiskyrė maksimalaus kritulių kiekio, išskiriantčio per 60 ir 90 dienų, mažėjimu, tačiau pokyčiai nebuvo statistiškai reikšmingi (Mačiulytė ir kt., 2022).



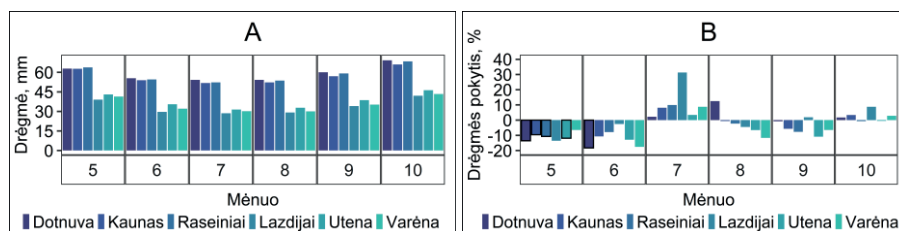
3.11 pav. Maksimalaus metinio kritulių kiekio, išskiriantčio per 30 (A), 60 (B) ir 90 (C) dienų, datos pokyčiai (dienomis per 70 metų) 1950–2019 metais. Statistiškai reikšmingi pokyčiai pažymėti pliuso ženklų (Mačiulytė ir kt., 2022).

Taip pat keičiasi kritulių kiekio, iškritusio per 30, 60, 90 dienų, metinio maksimumo data ir didžiojoje teritorijos dalyje maksimumas fiksuojamas vis anksčiau (3.11 pav.). Didelėje analizuotos teritorijos dalyje ilgalaikio lietingo laikotarpio maksimumas slenkasi į pirmąją vasaros pusę. Lietuvoje didžiausias paankstėjimas nustatytas Žemaičių aukštumoje bei šalies šiaurės rytuose (Mačiulytė ir kt., 2022).

Atliktų tyrimų visame Baltijos jūros regione metu nustatyta, kad metinis maksimalaus paros kritulių kiekis didžiojoje regiono dalyje reikšmingai išaugo per paskutinius 50 metų. Kartu pasikeitė ir maksimumo data – kritulių maksimumas fiksuojamas vis vėliau (Dyrrdal ir kt., 2021). Vertinant gausių kritulių kiekį, išskiriantį per 1, 3, 6, 12 val., nustatyta, kad Baltijos jūros regione ekstremalus kritulių kiekis susijęs su oro temperatūra – maksimumas didesnis ten, kur buvo aukštesnė vidutinė vasaros sezono temperatūra. Metinis valandos kritulių kiekio maksimumas visame Baltijos jūros regione dažniausiai fiksuojamas nuo rugpjūčio vidurio iki spalio pradžios, o 12 valandų – nuo rugsėjo pradžios iki spalio pabaigos (Olsson ir kt., 2022).

3.2.3. Dirvožemio drėgmė

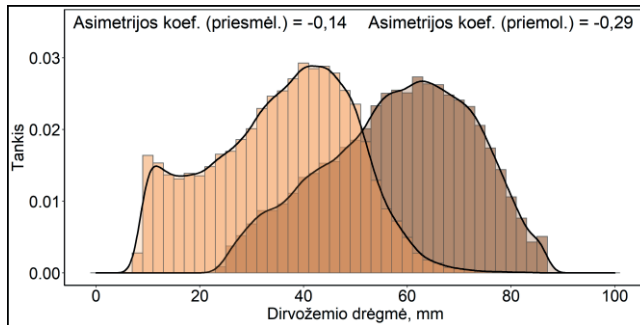
Dirvožemio drėgmės modeliavimas 0–20 cm dirvožemio sluoksnyje SWAP modeliu atliktas 1951–2020 metų šiltajam sezonui. Vidutinė sezono dirvožemio drėgmė priemolinguose dirvožemiuose (Dotnuva, Kaunas, Raseiniai) siekia 57,3–59,3 mm, o priemolinguose (Lazdijai, Utena, Varėna) – 33,7–37,9 mm. Mažiausiomis dirvožemio drėgmės reikšmėmis pasižymi liepa ir rugpjūtis (priemolinguose 52–54 mm, priemolinguose 28–30 mm), o didžiausiomis – sezono pradžia ir pabaiga (priemolinguose 63–68 mm, priemolinguose 39–43 mm) (3.12A pav.).



3.12 pav. Vidutinė 0–20 cm dirvožemio sluoksnio drėgmė (mm) (A) ir dirvožemio drėgmės pokytis (% per 70 metų) (B) kiekvieną 1951–2020 metų mėnesį, apskaičiuoti naudojant Seno regresijos kreivę. Statistiškai reikšmingi pokyčiai ($p < 0,05$) paryškinti apvalu.

Statistiškai reikšmingi dirvožemio drėgmės pokyčiai fiksuoti gegužės mėnesį Dotnuvoje, Kaune, Raseiniuose ir Utenoje, kur dirvožemio drėgmė sumažėjo 10–14 %, o birželį – reikšmingas pokytis tik Dotnuvoje (-18 %) (3.12B pav.). Nors ir dauguma dirvožemio drėgmės pokyčių nėra statistiškai reikšmingi, tačiau visose stovyse drėgmė sumažėjo birželį (3–18 %), išaugo liepą (2–31 %), sumažėjo rugpjūčio mėnesį (1–12 %, išskyrus Dotnuvą). Rugsėjo ir spalio mėnesiais pokyčių ženklas nėra vienodas (nuo -11 iki +9 %).

Kasdienį dirvožemio drėgmės reikšmių skirstiniai priemolinguose ir priemolinguose dirvožemiuose pasižymi skirtinga forma. Priemolingu dirvožemių skirstinys pasižymi didesne neigiama asimetrija nei priemolingu (3.13 pav., 3.14 pav.).



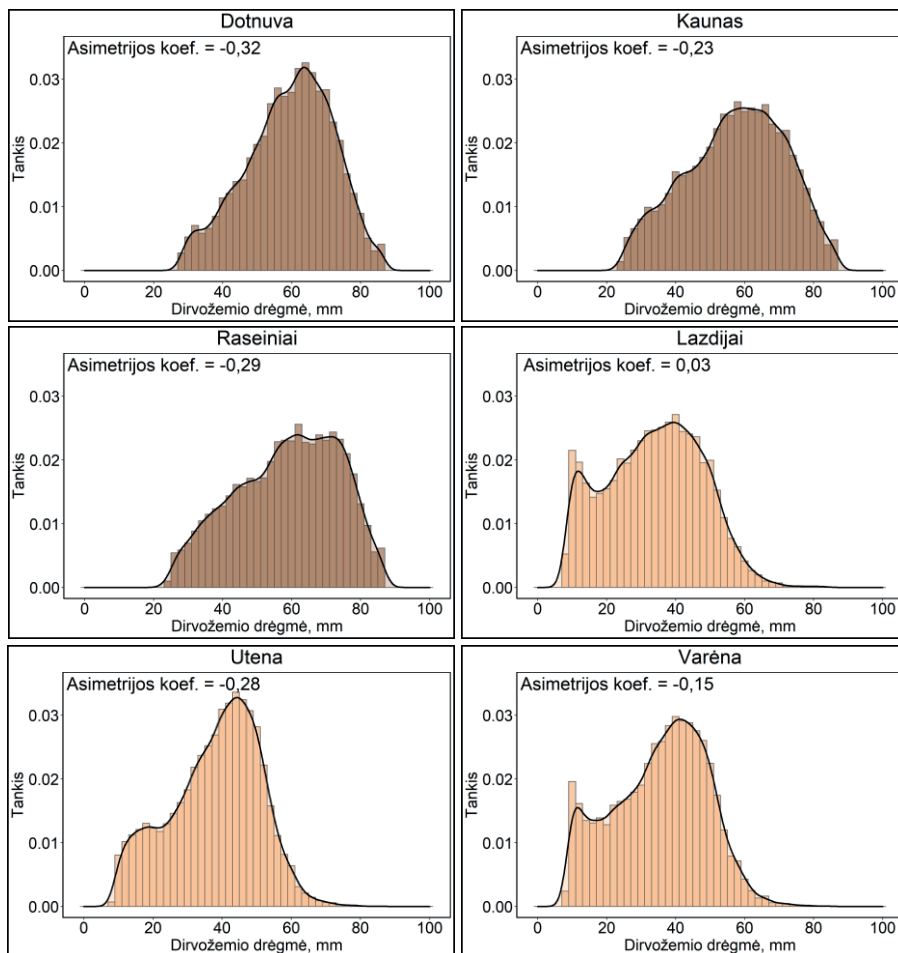
3.13 pav. 0–20 cm dirvožemio sluoksnio drėgmės pasiskirstymas priemolinguose (tamsiai ruda) ir priesmėlinguose (šviesiai ruda) dirvožemiuose 1951–2020 metų gegužės–spalio mėnesiais.

Per 1951–2020 metų laikotarpį absoliučiai mažiausia dirvožemio drėgmės reikšmė priesmėlinguose dirvožemiuose buvo 8,5 mm (Lazdijai), o priemolinguose – 23,3 mm (Kaunas). Didžiausia drėgmės reikšmė priesmėlinguose fiksuota Utenoje – siekė 85,7 mm, o priemolinguose – visose stotyse pasiekta maksimali 86 mm vertė (3.2 lentelė). Tai reiškia, kad drėgmės svyravimas priesmėlinguose dirvožemiuose pasižymi didesne amplitude.

3.2 lentelė. Minimali ir maksimali sumodeliuota 0–20 cm dirvožemio sluoksnio drėgmė ir metai pagal modelį (modelio min., modelio maks., mm) 1951–2020 metų gegužės–spalio mėnesiais. * rodo, kad buvo keleri metai su šia reikšme toje pačioje stotyje.

| Stotis | Dotnuva | Kaunas | Raseiniai | Lazdijai | Utena | Varėna |
|----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Modelio min. | 26,7 2006 | 23,6 2015 | 23,3 1971 | 8,5 2015 | 8,7 2015 | 8,6 1963 |
| Modelio maks. | 86,0 * | 86,0 * | 86,0 * | 83,3 1956 | 85,7 2000 | 84,1 2005 |

Šiuos skirtumus galima susieti su modelyje kalibravimo metu nustatytomis dirvožemio savybėmis. Dirvožemio drėgmės minimumą SWAP modelyje nustato hidraulinio laidumo prisotintomis sąlygomis parametras (2.2 lentelė, KSATEXM parametras), kuris priemolingų dirvožemių paviršiuje yra 15,56 cm per dieną, o priesmėlingų – 32,56 cm per dieną, o tai rodo, kad priesmėlingi pasižymi didesne infiltracija ir laidumu vandeniui nei priemolingi. Taip pat tai nulemia ir džiūvimo kreivės parametras (ALFA), kuris priemolinguose yra mažesnis nei priesmėlinguose. Be to, dirvožemio drėgmė natūraliomis sąlygomis, kaip aptarta 1.1 poskyryje, nenukrinta iki visiško nulio. Visada joje lieka tam tikras drėgmės kiekis, nors augalams ir nėra prieinamas (neproduktyvioji drėgmė).



3.14 pav. 0–20 cm dirvožemio sluoksnio drėgmės pasiskirstymas priemolinguose (tamsiai ruda) ir priemolinguose (šviesiai ruda) dirvožemiuose 1951–2020 metų gegužės–spalio mėnesiais.

Maksimalios drėgmės reikšmės susijusios su prisotinto vandens kiekio parametru (2.2 lentelė, OSAT parametras), kuris tiek priemolinguose, tiek priemolinguose dirvožemiuose yra vienodas – $0,43 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Šią reikšmę konvertavus į tyrime taikomus milimetrus (mm) 0–20 cm gyliui žymėti, 86 mm yra maksimalus galimas dirvožemio drėgmės kiekis (3.2 lentelė). Dėl maksimalaus galimo dirvožemį prisotinusių drėgmės kiekio, net ir besitęsiant pertekliniam drėkinimui krituliais, dirvožemis modelyje papildomai neprisotinamas, pasiekama maksimali drėgmė ties 86 mm riba, todėl priemolingu dirvožemių drėgmės skirstinio dešinioji pusė (3.13 pav., 3.14 pav.) pasižymi aiškiai apibrėžta maksimalia verte. Absoliutus

maksimumas buvo fiksuotas visose priemolingo dirvožemio stotyse, tačiau priesmėlinguose dirvožemiuose jis nė karto pasiektas nebuvo (3.2 lentelė). Kita vertus, priesmėlinguose dirvožemiuose dažniau fiksuojamos artimos minimalioms dirvožemio drėgmės reikšmės (3.13 pav., 3.14 pav.).

Apibendrinant galima teigti, kad dėl klimato kaitos oro temperatūra kyla visoje Lietuvoje, auga metinis kritulių kiekis, tačiau sezono viduje jo kiekis persiskirsto. Kartu su besikeičiančiomis meteorologinėmis sąlygomis pakito ir dirvožemio drėgmė tiek priesmėlinguose, tiek priemolinguose dirvožemiuose.

3.3. Ryšys tarp meteorologinių rodiklių ir dirvožemio drėgmės

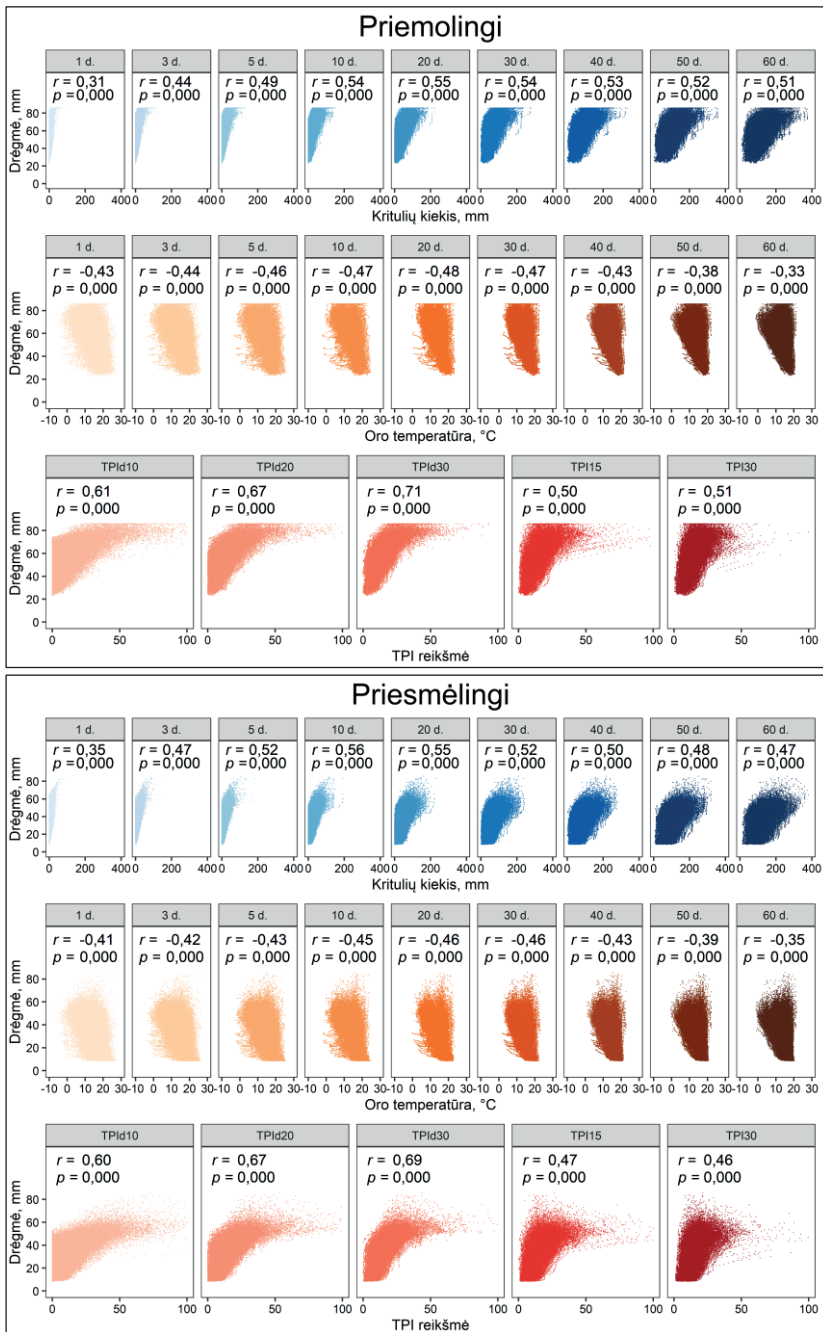
Galimas minimalias ir maksimalias kiekvieno dirvožemio drėgmės reikšmes lemia dirvožemio savybės. Tačiau drėgmės reikšmių kaita labiausiai priklauso nuo vyraujančių meteorologinių sąlygų. Dirvožemio drėgmę supaprastintai galima vertinti kaip drėkinimo krituliais ir drėgmės netekties garavimo bei infiltracijos metu rezultata. Siekiant įvertinti, kaip meteorologinės sąlygos lemia dirvožemio drėgmę, buvo analizuoti įvairių laikotarpių vidutinės oro temperatūros, kritulių kiekio ir jų santykio ryšiai su dirvožemio drėgme (3.3 lentelė, 3.15 pav.). Šiame poskyryje temperatūros ir kritulių santykio indeksai TPI (TPI_{d10} , TPI_{d20} , TPI_{d30} , TPI_{15} , TPI_{30}) vartojami ne kaip sausras indikatoriai, o rodikliai, parodantys potencialų drėkinimo (kritulių) ir garavimo (temperatūros) santykį.

Dirvožemio drėgmės reikšmės geriausiai koreliuoja su TPI_{d30} indeksu ($r = 0,67-0,72$), kuris skaičiuojamas kaip 30 dienų kritulių ir oro temperatūros sumų santykis (3.3 lentelė, 3.15 pav.). Reikšmingi, nors ir šiek tiek silpnėsi, ryšiai fiksuojami ir su TPI_{d20} indeksu ($r = 0,67-0,68$). Dar trumpesnę laikotarpį apibūdinantis TPI_{d10} , tikriausiai, yra per trumpas, nes ryšiai silpnėsi.

3.3 lentelė. Koreliacinis ryšys tarp 0–20 cm dirvožemio sluoksnio drėgmės ir kasdienių TPI indekso (TPI_{d10} , TPI_{d20} , TPI_{d30} , TPI_{15} , TPI_{30}) reikšmių, prieš tai buvusio kritulių kiekio ir vidutinės oro temperatūros už 1–60 dienų laikotarpį 1951–2020 metų gegužės–spalio mėnesiais. Visi koreliacijos koeficientai statistiškai reikšmingi ($p < 0,05$). Stipriausi kiekvieno rodiklio ryšiai paryškinti.

| Rod. \ laikot. | Dotnuva | Kaunas | Raseiniai | Lazdijai | Utena | Varėna | |
|--------------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| TPI_{d10} | 0,63 | 0,60 | 0,25 | 0,56 | 0,19 | 0,45 | |
| TPI_{d20} | 0,68 | 0,68 | 0,68 | 0,67 | 0,67 | 0,67 | |
| TPI_{d30} | 0,71 | 0,72 | 0,72 | 0,70 | 0,67 | 0,69 | |
| TPI_{15} | 0,54 | 0,43 | 0,60 | 0,57 | 0,49 | 0,41 | |
| TPI_{30} | 0,49 | 0,48 | 0,59 | 0,53 | 0,44 | 0,42 | |
| Kritulių suma | 1 d. | 0,32 | 0,31 | 0,31 | 0,34 | 0,36 | 0,36 |
| | 3 d. | 0,45 | 0,44 | 0,43 | 0,46 | 0,48 | 0,49 |
| | 5 d. | 0,51 | 0,49 | 0,49 | 0,51 | 0,53 | 0,54 |
| | 10 d. | 0,56 | 0,54 | 0,54 | 0,54 | 0,57 | 0,58 |
| | 20 d. | 0,56 | 0,55 | 0,57 | 0,54 | 0,56 | 0,57 |
| | 30 d. | 0,54 | 0,54 | 0,57 | 0,52 | 0,53 | 0,53 |
| | 40 d. | 0,51 | 0,52 | 0,56 | 0,50 | 0,50 | 0,49 |
| | 50 d. | 0,49 | 0,51 | 0,56 | 0,49 | 0,49 | 0,47 |
| 60 d. | 0,49 | 0,51 | 0,56 | 0,48 | 0,48 | 0,46 | |
| Vidutinė oro temperatūra | 1 d. | -0,46 | -0,42 | -0,43 | -0,41 | -0,42 | -0,40 |
| | 3 d. | -0,47 | -0,43 | -0,44 | -0,42 | -0,43 | -0,42 |
| | 5 d. | -0,48 | -0,44 | -0,45 | -0,43 | -0,44 | -0,43 |
| | 10 d. | -0,50 | -0,46 | -0,47 | -0,44 | -0,46 | -0,45 |
| | 20 d. | -0,51 | -0,47 | -0,48 | -0,45 | -0,47 | -0,47 |
| | 30 d. | -0,48 | -0,46 | -0,47 | -0,44 | -0,47 | -0,47 |
| | 40 d. | -0,44 | -0,43 | -0,44 | -0,41 | -0,44 | -0,45 |
| | 50 d. | -0,38 | -0,39 | -0,39 | -0,37 | -0,40 | -0,41 |
| 60 d. | -0,32 | -0,34 | -0,33 | -0,32 | -0,35 | -0,37 | |

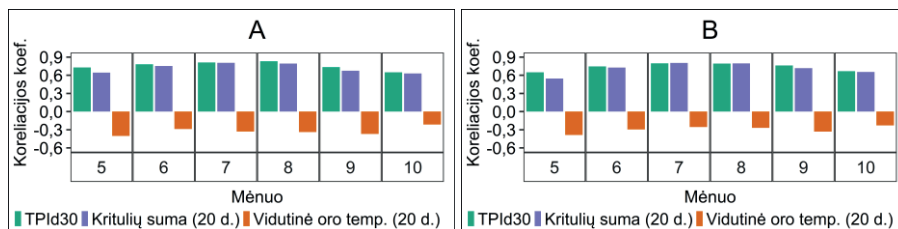
Ryšys tarp dirvožemio drėgmės ir TPI_{15} bei TPI_{30} indekso reikšmių irgi silpnesnis nei su TPI_{d30} ar TPI_{d20} tikėtina todėl, kad jos apibūdina jau per ilgo laikotarpio (atitinkamai 45 ir 60 prieš tai buvusių dienų) meteorologines sąlygas. Tokių ilgų laikotarpių apibūdinimas vienu vidutiniu meteorologinio rodiklio dydžiu gali per mažai atspindėti per laikotarpį vykstančius pokyčius.



3.15 pav. Ryšys tarp 0–20 cm dirvožemio sluoksnio drėgmės ir prieš tai buvusio kritulių kiekio, vidutinės oro temperatūros už 1–60 dienų laikotarpį ir kasdienių TPI indekso (TPI_{d10}, TPI_{d20}, TPI_{d30}, TPI₁₅, TPI₃₀) reikšmių 1951–2020 metų gegužės–spalio mėnesiais priemolinguose ir priesmėlinguose dirvožemiuose.

Vien tik temperatūra ir tik krituliai įvairiais laikotarpiais turi silpnėsnes sąsajas su dirvožemio drėgme. Be to, kritulių kiekio poveikis dirvožemio drėgmei pasireiškia greičiau, palyginti su oro temperatūros: stipriausiai su drėgme siejasi per 10–20 dienų iškritęs kritulių kiekis (atskirose stotyse $r = 0,54–0,58$) ir 20–30 dienų vidutinė oro temperatūra ($r = -0,44 – -0,51$) (3.3 lentelė, 3.15 pav.).

Vertinant, su koku rodikliu dirvožemio drėgmė siejasi priemolinguose ir priemolinguose dirvožemiuose atskirai, pastebima, kad stipriausi drėgmės ryšiai priemolinguose yra su 20–30 dienų, o priemolinguose su trumpesnio, 10–20 dienų, laikotarpio kritulių suma (3.3 lentelėje paryškinti r).

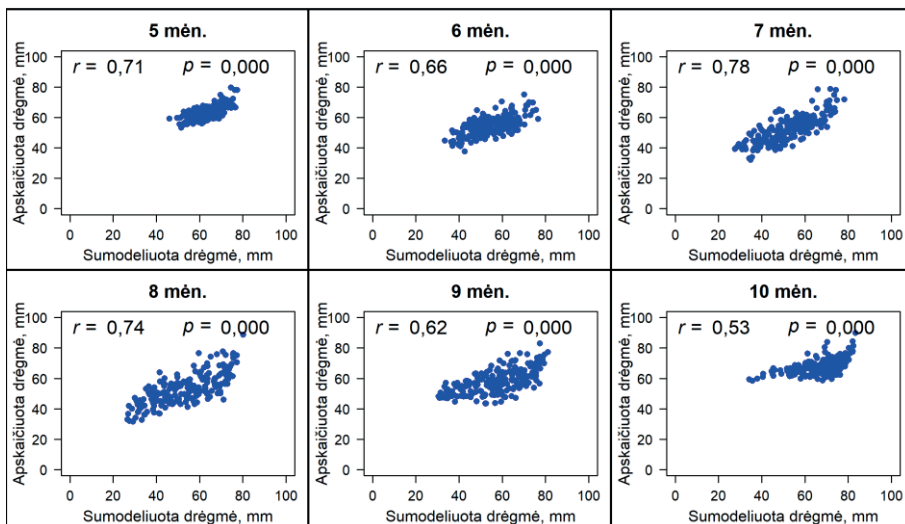


3.16 pav. Koreliacinis ryšys priemolinguose (A) ir priesmėlinguose (B) dirvožemiuose tarp 0–20 cm dirvožemio sluoksnio drėgmės ir kasdinių TPI_{d30} reikšmių, prieš tai buvusio kritulių kiekio ir vidutinės oro temperatūros už 20 dienų laikotarpį 1951–2020 metų gegužės–spalio mėnesiais. Visi koreliacijos koeficientai statistiškai reikšmingi ($p < 0,05$).

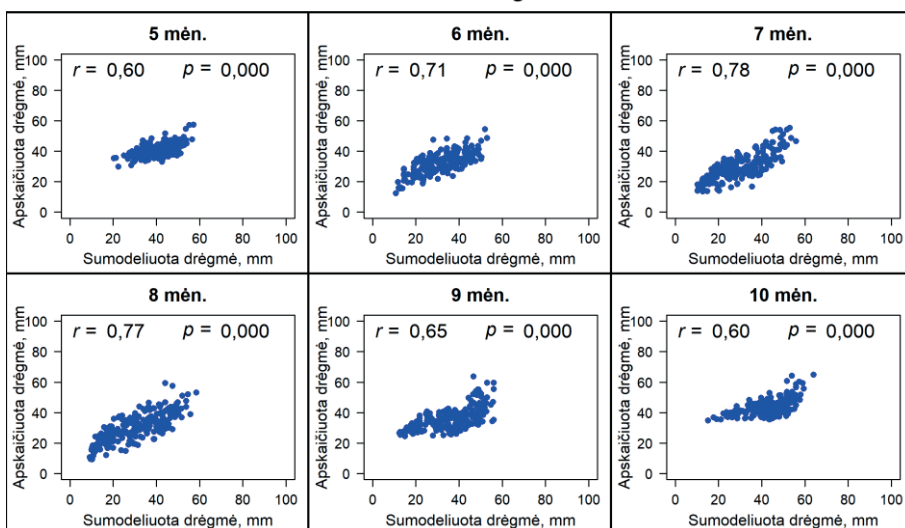
Vertinant, kaip drėgmė priklauso nuo meteorologinių parametrų atskirais mėnesiais, nustatyta, kad esminio skirtumo tarp meteorologinių sąlygų poveikio dirvožemio drėgmei nėra (3.15 pav.). Iš visų analizuotų rodiklių visais mėnesiais stipriausias ryšys yra su TPI_{d30}, kaip ir viso sezono koreliacinėje analizėje (3.3 lentelė, 3.15 pav.). Sezono pradžioje (gegužę) ir pabaigoje (spalį) TPI_{d30} ir drėgmės ryšys yra silpniausias ($r = 0,65–0,73$), palyginti su likusiais mėnesiais ($r = 0,73–0,83$) (3.16 pav.). Kritulių ir temperatūros santykis ypač svarbus liepos ir rugpjūčio mėnesiais.

Analizuojant oro temperatūros ir kritulių sąsajas su dirvožemio drėgme pastebima, kad sezono pradžioje dirvožemio drėgmės režimas labiau yra nulemiamas temperatūros nei kritulių, o tai galima sieti su po žiemos vis dar prisotintu dirvožemiu, kurio drėgmei kritulių kiekis turi mažiau įtakos. Be to, kuo aukštesnė oro temperatūra sezono pradžioje, tuo anksčiau prasideda vegetacijos sezonas ir žiemą sukauptos drėgmės atsargos mažėja. Sezono viduryje vidutiniškai drėgmė yra mažesnė nei pradžioje (3.12A pav.), todėl kritulių kiekis tampa svarbiausiu veiksnium.

Priemolingi



Priesmėlingi



3.17 pav. Ryšys tarp sumodeliuotos 0–20 cm dirvožemio sluoksnio drėgmės (mm) ir apskaičiuotos drėgmės pagal daugianarės regresijos modelį (mm) (3 lygtis) 1951–2020 metų gegužės–spalio mėnesiais priemolinguose ir priesmėlinguose dirvožemiuose.

Siekiant įvertinti, kaip atskirų mėnesių dirvožemio drėgmė priklauso nuo oro temperatūros ir kritulių kiekio komplekso, buvo sudaryta daugianarės regresijos lygtis (3 lygtis, 3.17 pav.). Pastebima, kad visais mėnesiais sumodeliuotos dirvožemio drėgmės ir apskaičiuotos pagal daugianarę regresijos lygtį drėgmės ryšiai yra stiprūs ir statistškai reikšmingi tiek

priemolinguose, tiek priesmėlinguose dirvožemiuose. Ypač glaudžiais ryšiais pasižymi liepos ir rugpjūčio mėnesiai ($r = 0,74-0,78$), todėl tai reiškia, kad šiais mėnesiais remiantis vien oro temperatūros ir kritulių duomenimis, dirvožemio drėgmės kintamumą bent apytikriai nustatyti galima tiksliau nei sezono pradžioje ir pabaigoje.

Vertinant priemolinguos ir priesmėlingus dirvožemius atskirai galima pastebėti, kad dirvožemio drėgmės pokyčiams priesmėlinguose dirvožemiuose kritulių kiekio ir oro temperatūros pokytis yra šiek tiek svarbesnis nei priemolinguose (išskyrus gegužės mėnesį). Tai galėtų nulemti skirtingos dirvožemių infiltracinės savybės, nes priesmėlingi dirvožemiai pasižymi didesniu laidumu, tai ir jautrumas iškritusiems gausiems krituliams ar laikotarpiams be kritulių, kaip aptarta 3.4.1 poskyryje, yra didesnis.

Apibendrinant galima teigti, kad dirvožemio drėgmės reikšmių kintamumas daugiausia nulemtas prieš tai buvusių 20–30 dienų oro temperatūros ir kritulių santykio (TPI_{d20} , TPI_{d30}). Kritulių poveikis mažiau inertiškas nei oro temperatūros, nes ryšys tarp dirvožemio drėgmės yra stipriausias su prieš tai buvusiu 10–20 dienų kritulių kiekiu priesmėlinguose dirvožemiuose, 20–30 dienų kritulių kiekiu priemolinguose ir su 20–30 dienų oro temperatūra abiejuose granulimetrinės sudėties dirvožemiuose.

3.4. Gausių kritulių ir periodų be kritulių ryšys su dirvožemio drėgme

Šiame poskyryje analizuojamas įvairaus gausumo kritulių per parą ir įvairios trukmės laikotarpių be kritulių poveikis dirvožemio drėgmei. Taip pat įvertinama, kaip šie atvejai susiję su prieš juos buvusios drėgmės reikšmėmis.

3.4.1. Gausių kritulių poveikis dirvožemio drėgmei

1951–2020 metų gegužės–spalio mėnesiais gausių kritulių (≥ 10 mm per parą) skaičius analizuojamose stotyse vidutiniškai kinta nuo 9,1 Dotnuvoje iki 11,5 Utenoje per metus (3.4 lentelė). Gausesnių nei 30 mm kritulių kiekio per parą atvejai yra reti ir fiksuojami ne kiekvienais metais.

3.4 lentelė. Gausių kritulių (≥ 10 mm; intervalai 10–20, 20–30, 30–40 mm ir > 40 mm) pasikartojimas per 10 metų laikotarpį atskirais mėnesiais ir gegužės–spalio mėnesių maksimalaus paros kritulių kiekio vidurkis (Maks.) 1951–2020 metais.

| Mėn. | ≥ 10 | 10–20 | 20–30 | 30–40 | > 40 | Maks. |
|-----------|-----------|-------|-------|-------|--------|-------|
| | Dotnuva | | | | | |
| 5 | 11,8 | 9,1 | 1,0 | 0,7 | 1,0 | 17,2 |
| 6 | 16,2 | 11,4 | 3,8 | 0,3 | 0,7 | 18,6 |
| 7 | 22,7 | 15,0 | 5,0 | 1,7 | 1,0 | 22,2 |
| 8 | 16,8 | 11,0 | 3,6 | 1,7 | 0,5 | 20,5 |
| 9 | 11,0 | 9,1 | 1,7 | 0,2 | 0,0 | 13,3 |
| 10 | 12,4 | 11,0 | 1,2 | 0,2 | 0,0 | 12,7 |
| 5–10 | 91,2 | 66,7 | 16,4 | 4,8 | 3,3 | 34,7 |
| Kaunas | | | | | | |
| 5 | 12,2 | 9,9 | 1,9 | 0,3 | 0,1 | 14,7 |
| 6 | 21,1 | 16,0 | 3,6 | 0,6 | 0,9 | 20,6 |
| 7 | 26,8 | 19,3 | 4,7 | 1,9 | 0,9 | 22,2 |
| 8 | 23,7 | 16,3 | 4,0 | 2,1 | 1,3 | 24,3 |
| 9 | 13,8 | 11,7 | 1,4 | 0,6 | 0,1 | 15,2 |
| 10 | 14,1 | 12,3 | 1,4 | 0,1 | 0,3 | 14,2 |
| 5–10 | 112,0 | 85,4 | 17,0 | 5,6 | 3,6 | 35,6 |
| Raseiniai | | | | | | |
| 5 | 12,5 | 11,1 | 0,7 | 0,7 | 0,0 | 13,9 |
| 6 | 18,4 | 13,0 | 3,3 | 1,7 | 0,4 | 20,4 |
| 7 | 25,4 | 17,7 | 5,1 | 1,9 | 0,7 | 22,2 |
| 8 | 21,7 | 15,1 | 4,4 | 1,3 | 0,9 | 21,1 |
| 9 | 15,0 | 12,3 | 1,9 | 0,7 | 0,1 | 15,7 |
| 10 | 15,9 | 14,0 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 14,2 |
| 5–10 | 109,0 | 83,3 | 17,1 | 6,4 | 2,3 | 32,4 |
| Lazdijai | | | | | | |
| 13,7 | 11,6 | 1,9 | 0,1 | 0,1 | 15,6 | |
| 22,2 | 16,3 | 4,9 | 0,3 | 0,7 | 21,5 | |
| 26,2 | 17,9 | 5,0 | 2,4 | 0,9 | 22,9 | |
| 20,6 | 13,3 | 4,0 | 2,0 | 1,3 | 23,0 | |
| 15,7 | 12,0 | 2,9 | 0,4 | 0,4 | 17,3 | |
| 10,4 | 8,1 | 1,9 | 0,4 | 0,0 | 12,8 | |
| 109,0 | 79,1 | 20,4 | 5,7 | 3,4 | 35,5 | |
| Utena | | | | | | |
| 15,3 | 12,4 | 1,6 | 0,9 | 0,4 | 16,9 | |
| 21,5 | 14,7 | 5,4 | 1,3 | 0,1 | 20,5 | |
| 21,9 | 17,0 | 2,9 | 1,1 | 0,9 | 21,8 | |
| 25,3 | 17,6 | 4,4 | 2,4 | 0,9 | 23,1 | |
| 17,7 | 14,3 | 2,7 | 0,6 | 0,1 | 16,1 | |
| 12,9 | 11,3 | 1,4 | 0,1 | 0,1 | 13,5 | |
| 115,0 | 87,3 | 18,4 | 6,4 | 2,6 | 33,4 | |
| Varėna | | | | | | |
| 14,6 | 11,6 | 2,3 | 0,6 | 0,1 | 16,4 | |
| 21,1 | 14,1 | 6,0 | 0,9 | 0,1 | 19,5 | |
| 25,5 | 17,4 | 5,3 | 1,9 | 0,9 | 22,2 | |
| 22,0 | 14,4 | 4,0 | 2,3 | 1,3 | 23,3 | |
| 15,7 | 12,1 | 2,3 | 0,7 | 0,6 | 17,3 | |
| 12,8 | 10,7 | 2,0 | 0,0 | 0,1 | 13,8 | |
| 112,0 | 80,4 | 21,9 | 6,3 | 3,1 | 34,8 | |

3.5 lentelė. Maksimalaus paros kritulių kiekio pokyčiai (mm per 70 metų) kiekvieną mėnesį atskirai 1951–2020 metų gegužės–spalio mėnesiais. Statistiškai reikšmingi pokyčiai ($p < 0,05$) paryškinti.

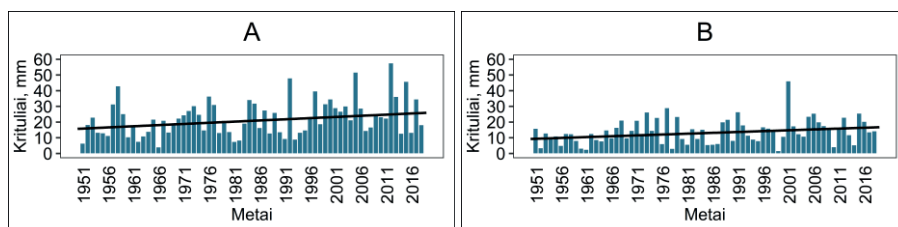
| Mėnuo | Dotnuva | Kaunas | Raseiniai | Lazdijai | Utena | Varėna |
|-------|-------------|-------------|-----------|-------------|-------|------------|
| 5 | -2,6 | 4,1 | -3,7 | 6,3 | 0,8 | 5,6 |
| 6 | -7,1 | -0,3 | 1,1 | 4,6 | -0,4 | -6,4 |
| 7 | 9,0 | 10,3 | 4,3 | 8,5 | 2,6 | 3,6 |
| 8 | 7,6 | 3,3 | 1,4 | 3,0 | 6,0 | 2,7 |
| 9 | 2,3 | -1,5 | -1,2 | 5,3 | -0,7 | 1,6 |
| 10 | 1,9 | 5,1 | 1,4 | 6,2 | 4,3 | 7,6 |
| 5–10 | -0,6 | 5,7 | 2,8 | 11,9 | 7,1 | -1,1 |

Daugiausia gausūs paros krituliai (10 mm ir daugiau) iškrinta liepą (23–27 atvejai per 10 metų), kai kuriais atvejais ir rugpjūtį (Utenoje 25 atvejai). Vidutiniškai didžiausias paros kritulių kiekis gegužės–spalio mėnesiais siekia

33–36 mm. 30 mm per parą ar gausesnį krituliai dažniausiai fiksuojami liepos ir rugpjūčio mėnesiais (3.4 lentelė).

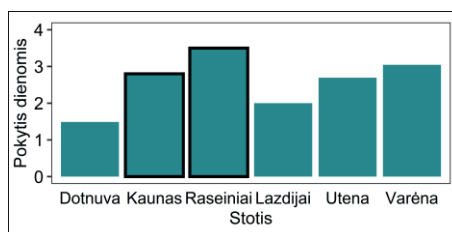
Daugumoje analizuojamų stočių gegužės–spalio mėnesių paros kritulių kiekio maksimumas analizuojamu laikotarpiu išaugo, bet tik Lazdijuose šis pokytis yra statistiškai reikšmingas (išaugo 11,9 mm) (3.5 lentelė). Varėnoje ir Dotnuvoje šio rodiklio reikšmės nežymiai sumažėjo.

Atskirais mėnesiais visose stotyse maksimalus paros kritulių kiekis išaugo liepos, rugpjūčio ir spalio mėnesiais, tačiau vos keli pokyčiai yra statistiškai reikšmingi. Kitais mėnesiais pokyčiai nevienareikšmiai. Didžiausi teigiami mėnesio pokyčiai nustatyti Kaune liepą ir Varėnoje spalį (3.18 pav.).

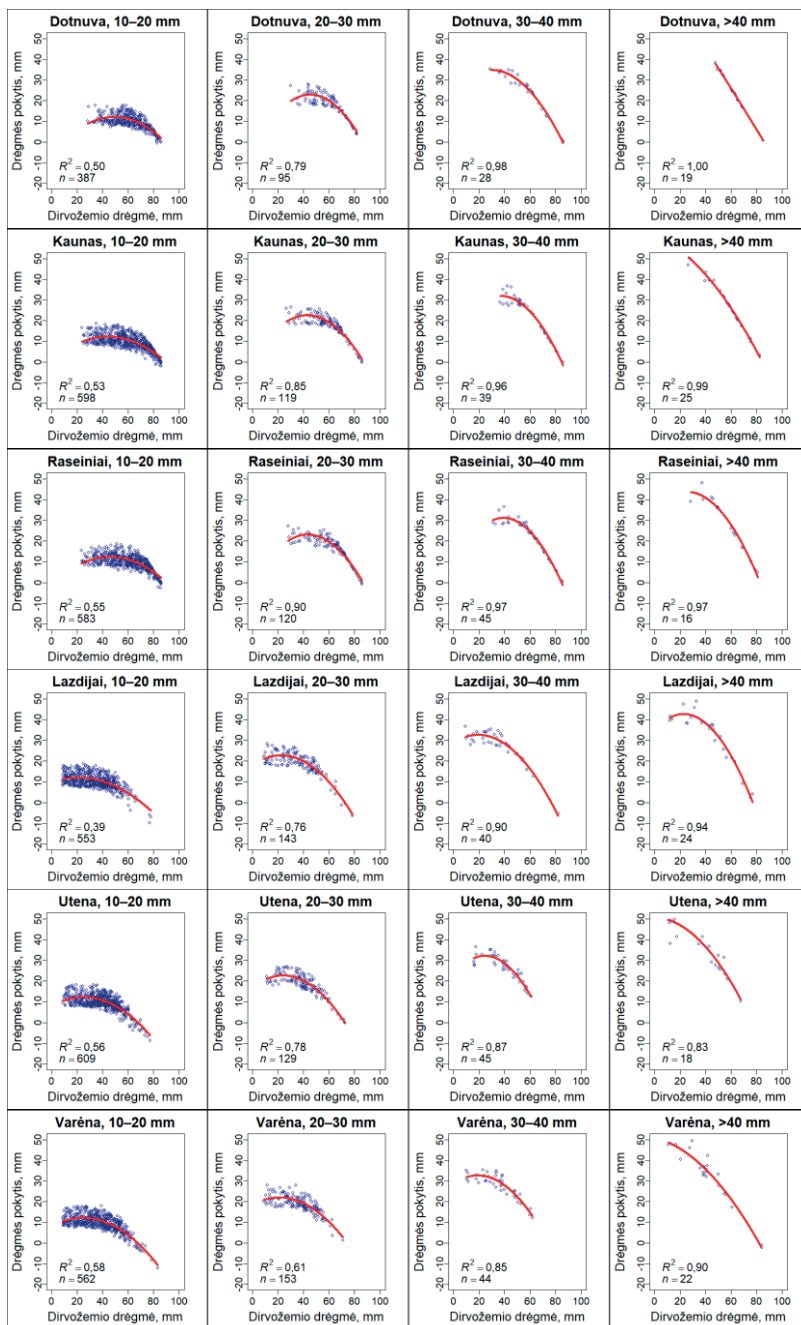


3.18 pav. Maksimalus paros kritulių kiekis (mm) Kaune liepos mėnesį (A) ir Varėnoje spalio mėnesį (B) 1951–2020 metais. Pateikti du didžiausiais ir statistiškai reikšmingais ($p < 0,05$) mėnesio pokyčiais pasižymintys atvejai pagal 3.5 lentelę.

Vertinant atvejų skaičių, kai kritulių per parą iškrinta bent 10 mm ir daugiau, nustatyta, kad 1951–2020 metais tokių atvejų visose stotyse padaugėjo (3.19 pav.). Tačiau statistiškai reikšmingi pokyčiai yra tik Raseiniuose ir Kaune.



3.19 pav. Dienų, kai kritulių kiekis per parą buvo ne mažesnis nei 10 mm, skaičiaus pokytis 1951–2020 metų gegužės–spalio mėnesiais. Statistiškai reikšmingi pokyčiai ($p < 0,05$) paryškinti juodu apvadu.



3.20 pav. 0–20 cm dirvožemio sluoksnio drėgmės pokytis (y ašis) iškritus 10–20 mm, 20–30 mm, 30–40 mm ir ≥ 40 mm kritulių per parą ir prieš tai buvęs drėgmės kiekis (x ašis) 1951–2020 metų gegužės–spalio mėnesiais. Raudona linija – antro laipsnio polinominės funkcijos kreivė. Visi R^2 statistškai reikšmingi pagal $p < 0,05$.

Kritulių, ypač gausių, kiekio poveikis dirvožemio drėgmei priklauso nuo prieš tai buvusios dirvožemio drėgmės reikšmės (3.20 pav.). Kuo didesnė dirvožemio drėgmė, tuo reikalingas didesnis išskiriantųjų kritulių kiekis, kad drėgmės reikšmė išaugtų ar bent jau nesumažėtų. Vertinant gausių kritulių poveikį dirvožemio drėgmei nustatyta, kad kuo daugiau kritulių iškrinta, tuo ryšys tarp prieš kritulius buvusios dirvožemio drėgmės ir drėgmės pokyčio po jų yra stipresnis. Pavyzdžiui, R^2 tarp prieš tai buvusios drėgmės ir 10–20 mm iškritusio kritulių kiekio atskirose stotyse siekia 0,39–0,58, o 20–30 mm – 0,61–0,90 (3.20 pav.).

3.6 lentelė. 0–20 cm dirvožemio sluoksnio drėgmės pokyčio mediana priklausomai nuo prieš ekstremalius kritulius buvusio drėgmės kiekio (intervalais eilutėse) ir iškritusio ekstremalaus kritulių kiekio per parą (intervalais stulpeliuose) 1951–2020 metų gegužės–spalio mėnesiais. Brūkšnelis rodo, kad analizuojamu laikotarpiu tokių atvejų fiksuota nebuvo.

| Priemolingi dirvožemiai | | | | |
|-------------------------|-------|-------|-------|------|
| Dotnuva | | | | |
| Drėgmė \ P | 10–20 | 20–30 | 30–40 | > 40 |
| 0–10 mm | - | - | - | - |
| 10–20 mm | 13,6 | - | 35,3 | - |
| 20–30 mm | 11,4 | 20,9 | 34,2 | - |
| 30–40 mm | 10,3 | 22,5 | 31,9 | 36,7 |
| 40–50 mm | 10,8 | 20,6 | 27,5 | 34,1 |
| 50–60 mm | 10,2 | 19,2 | 23,9 | 23,1 |
| 60–70 mm | 7,6 | 11,0 | 12,8 | 16,5 |
| 70–80 mm | 3,3 | 4,2 | 0,3 | 0,8 |
| Kaunas | | | | |
| 0–10 mm | - | - | - | - |
| 10–20 mm | 12,5 | 23,7 | - | 50,1 |
| 20–30 mm | 11,2 | 21,8 | 28,8 | 39,2 |
| 30–40 mm | 10,6 | 21,7 | 30,5 | 39,7 |
| 40–50 mm | 11,1 | 19,6 | 27,9 | 28,4 |
| 50–60 mm | 9,9 | 17,5 | 20,1 | 20,8 |
| 60–70 mm | 7,6 | 12,8 | 12,8 | 11,0 |
| 70–80 mm | 2,4 | 2,1 | 2,5 | 3,2 |
| Raseiniai | | | | |
| 0–10 mm | - | - | - | - |
| 10–20 mm | 10,4 | 24,6 | - | 39,0 |
| 20–30 mm | 11,1 | 22,6 | 28,6 | 44,0 |
| 30–40 mm | 11,1 | 21,6 | 30,3 | 38,2 |
| 40–50 mm | 11,4 | 20,6 | 27,7 | 36,0 |
| 50–60 mm | 10,4 | 18,1 | 21,8 | 22,9 |
| 60–70 mm | 8,0 | 13,2 | 12,8 | 8,1 |
| 70–80 mm | 2,1 | 1,4 | 3,2 | 4,9 |

| Priesmėlingi dirvožemiai | | | | |
|--------------------------|-------|-------|-------|------|
| Lazdijai | | | | |
| Drėgmė \ P | 10–20 | 20–30 | 30–40 | > 40 |
| 0–10 mm | 11,1 | 21,4 | 31,5 | 40,1 |
| 10–20 mm | 11,3 | 22,4 | 34,0 | 39,8 |
| 20–30 mm | 10,4 | 21,1 | 30,1 | 45,8 |
| 30–40 mm | 8,9 | 17,6 | 27,1 | 36,2 |
| 40–50 mm | 7,1 | 14,6 | 21,0 | 25,6 |
| 50–60 mm | 3,2 | 6,8 | 12,6 | 19,8 |
| 60–70 mm | -6,9 | -1,2 | - | 3,3 |
| 70–80 mm | - | - | - | - |
| Utena | | | | |
| 0–10 mm | 12,0 | 20,1 | 29,3 | 48,8 |
| 10–20 mm | 10,5 | 23,9 | 35,0 | - |
| 20–30 mm | 10,4 | 21,2 | 29,4 | 39,5 |
| 30–40 mm | 9,6 | 17,8 | 26,2 | 29,2 |
| 40–50 mm | 7,0 | 14,1 | 19,5 | 26,0 |
| 50–60 mm | 1,2 | 8,0 | 12,6 | 10,4 |
| 60–70 mm | -4,0 | 1,6 | - | - |
| 70–80 mm | - | - | - | - |
| Varėna | | | | |
| 0–10 mm | 10,8 | 21,3 | 32,9 | 47,5 |
| 10–20 mm | 11,0 | 21,8 | 32,2 | 46,0 |
| 20–30 mm | 11,2 | 20,1 | 30,2 | 35,2 |
| 30–40 mm | 9,2 | 17,4 | 23,6 | 35,5 |
| 40–50 mm | 6,9 | 14,9 | 19,5 | 25,7 |
| 50–60 mm | 1,9 | 8,4 | 13,7 | 17,2 |
| 60–70 mm | -3,9 | 1,3 | - | - |
| 70–80 mm | -12,0 | - | - | - |

Pastebima, kad priemolinguose dirvožemiuose drėgmė po gausių kritulių dažniausiai didėja nepaisant prieš tai buvusio drėgmės kiekio (3.20 pav.). O

priesmėlinguose dirvožemiuose, ir ypač esant aukštomis drėgmės reikšmėms (virš 60 mm), net ir iškritus 10–20 mm kritulių kiekiui per parą, dirvožemio drėgmės pokytis gali būti neigiamas. Tai yra susiję su intensyvesne priesmėlingų dirvožemių infiltracija, kurios neatsveria netgi tokie gausūs krituliai. O kritulių kiekiui pasiekus 20–30 mm per parą ir daugiau, dirvožemio drėgmės kiekis didėja visada (išskyrus kelis pavienius atvejus Lazdijuose).

Vertinant kritulių poveikį dirvožemio drėgmei, kai jos reikšmės yra artimos medianai (priemolinguose dirvožemiuose 50–70 mm drėgmė, priesmėlinguose – 30–50 mm), iškritęs 10–20 mm kritulių kiekis vidutinę drėgmę padidina apie 7–10 mm (3.6 lentelė). Prieš tai esant mažesnei drėgmės reikšmei dėl kritulių drėgmė daugiau išauga, o esant didesnei drėgmei – dirvožemio drėgmės pokytis mažesnis.

Be to, galima pastebėti ir tai, kad iškritęs gausus kritulių kiekis drėgmę daugiau padidina priemolinguose nei priesmėlinguose dirvožemiuose ir tai taip pat susiję su didesne infiltracija pastaruosiuose.

Toks gausių kritulių poveikio dirvožemio drėgmei vertinimas turi ir aiškią praktinę prasmę. Žinant, kokia yra dirvožemio drėgmė ir remiantis prognozuojamu kritulių kiekiu, galima bent apytiksliai įvertinti, kokie galimi dirvožemio drėgmės pokyčiai gausių kritulių metu. Ypač tai svarbu tais atvejais, kai dirvožemis ir taip jau yra drėgnas, o perteklinės drėgnumo sąlygos potencialiai gali padaryti žalos žemės ūkiui.

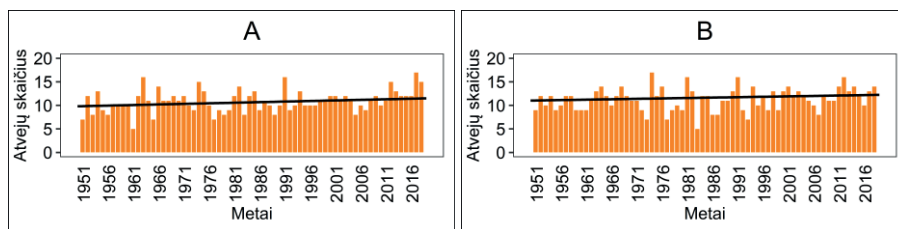
3.4.2. Laikotarpių be lietaus poveikis dirvožemio drėgmei

Laikotarpiai be kritulių yra labai svarbūs dirvožemio drėgmės pokyčiams. Šiame tyrime tokių laikotarpių poveikis įvertintas, naudojant išskirtus iki 10 dienų laikotarpius be kritulių 1951–2020 metų gegužės–rugsėjo mėnesiais. Didesni nei 10 dienų laikotarpiai be kritulių analizuojamu laikotarpiu yra pavieniai ir reti, todėl į analizę neįtraukti.

Kuo ilgesnė laikotarpio be kritulių trukmė, tuo mažiau tokių atvejų fiksuojama per metus (3.7 lentelė). Pavyzdžiui, 3 dienų be kritulių laikotarpiai per sezoną vidutiniškai pasikartoja 10–12 kartų, 5 dienų – apie 6 kartus, o 10 dienų – vidutiniškai vos apie 1–2 kartus per sezoną. Per analizuojamą laikotarpį ilgiausiai be kritulių buvo 19–20 dienų Kaune ir Varėnoje, o likusiose stotyse – 26–32 dienas. Įvairios trukmės laikotarpių be kritulių vidutinis pasikartojimas panašus tarp atskirų mėnesių ir analizuojamų stočių.

Atvejų skaičius, kai iš eilės nelyja 3 dienas, per analizuojamą 1951–2020 metų laikotarpį pakito mažai. Iš visų analizuojamų stočių tokių atvejų skaičius

statistiškai reikšmingai išaugo tik Utenoje (1,7 atvejo per 70 metų), o kitur pokyčiai statistiškai nereikšmingi (3.21 pav.).



3.21 pav. Atvejų skaičius per metus, kai periodų be lietaus trukmė buvo 3 dienos iš eilės Utenoje (A) ir Varėnoje (B) 1951–2020 metų gegužės–rugsėjo mėnesiais.

Laikotarpių be kritulių poveikis dirvožemio drėgmei priklauso nuo kelių veiksnių: prieš tą laikotarpį buvusios dirvožemio drėgmės kiekio, dirvožemio granulometrinės sudėties bei nelietingo laikotarpio trukmės.

Kuo didesnė prieš nelietingą laikotarpį buvo drėgmė ir kuo ilgesnį laikotarpį kritulių nebuvo, tuo labiau dirvožemio drėgmė mažėja (3 priedas, 3.22 pav., 3.23 pav.), nes vyksta intensyvi infiltracija į gilesnius dirvožemio sluoksnius. Pavyzdžiui, priemolinguose dirvožemiuose prieš nelietingą laikotarpį buvusi 50–60 mm dirvožemio drėgmė po 3 dienų sumažėja apie 5 mm, po 5 dienų – apie 7–8 mm, o po 10 dienų – apie 12–14 mm (3 priedas).

Infiltracijos greitis priklauso nuo dirvožemio – priemolinguose infiltracija yra stipresnė nei priemolinguose (3.22 pav., 3.23 pav.). Pavyzdžiui, jei nelyja 5 dienas, o dirvožemio drėgmė prieš tai buvo 50–60 mm, tai drėgmė po nelietingo laikotarpio priemolinguose dirvožemiuose sumažėja apie 7–8 mm, o priemolinguose – 10–12 mm (3 priedas).

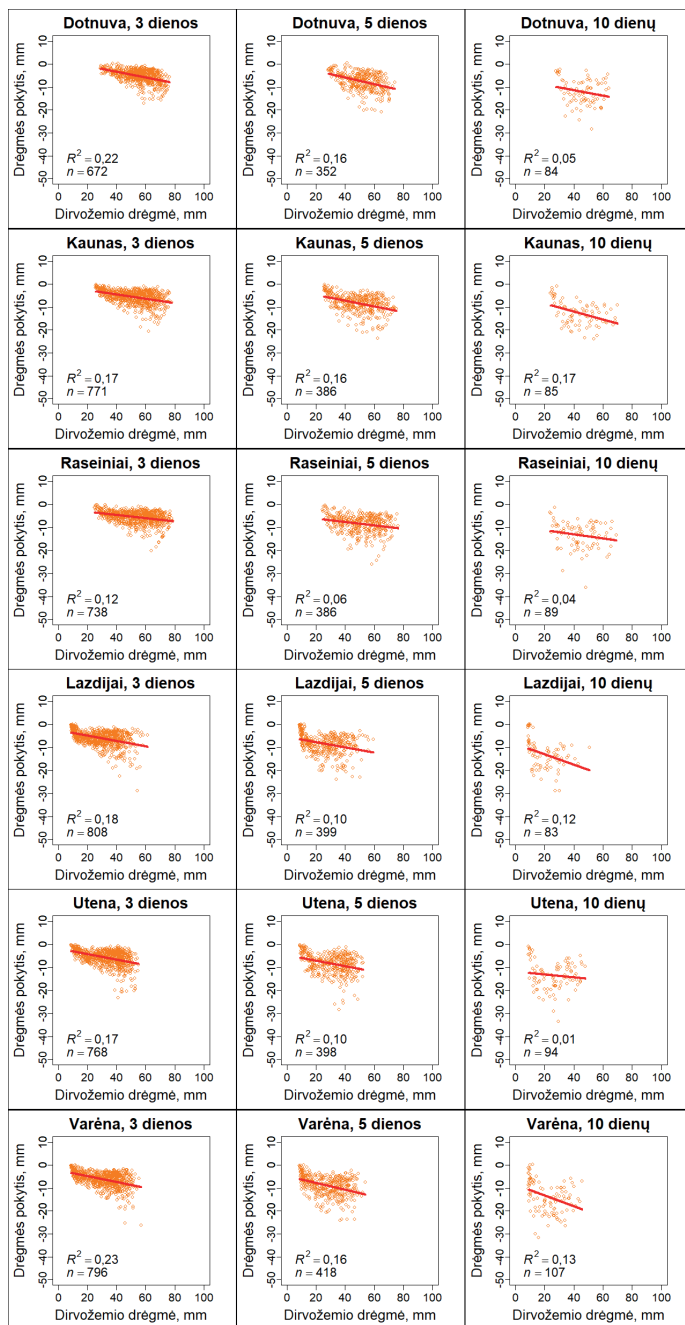
Esant itin mažoms dirvožemio drėgmės reikšmėms (priemolinguose dirvožemiuose tai apie 10 mm, o priemolinguose – apie 25 mm) drėgmė beveik nebemažėja, nes jau yra arti savo minimumo. Tuomet drėgmės pokytis, nepriklausomai nuo nelietingo laikotarpio trukmės, gali siekti vos iki poros mm (3 priedas).

Toks drėgmės pokyčio vertinimas gali suteikti galimybes itin paprastai įvertinti galimus drėgmės pokyčius žinant pradinę drėgmę ir numatomą nelietingo periodo trukmę.

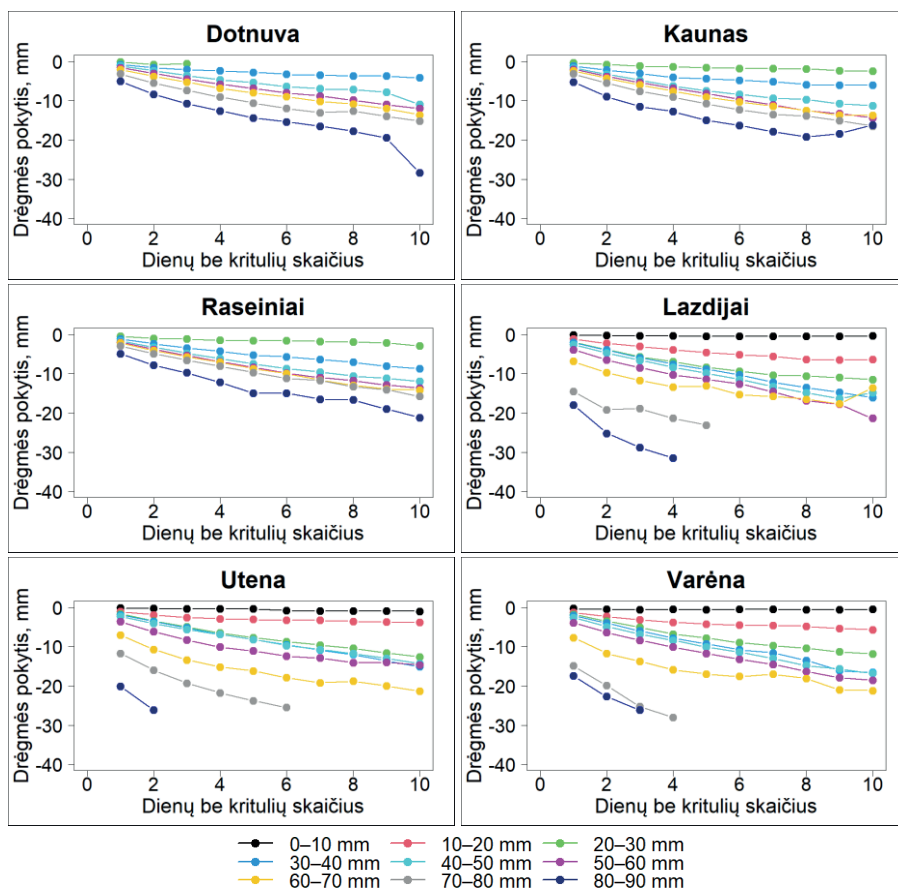
3.7 lentelė. Vidutinis atvejų skaičius per mėnesį, kai kritulių nebuvo 3–10 dienų iš eilės 1951–2020 metų gegužės–rugsėjo mėnesiais. Maks. – ilgiausias stovyje fiksuotas laikotarpis be kritulių (dienomis) ir metai.

| Mėn. | 3 d. | 4 d. | 5 d. | 6 d. | 7 d. | 8 d. | 9 d. | 10 d. | Maks. |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| Dotnuva | | | | | | | | | |
| 5 | 2,7 | 1,9 | 1,5 | 1,0 | 0,7 | 0,6 | 0,4 | 0,3 | |
| 6 | 2,2 | 1,7 | 1,1 | 0,8 | 0,6 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | |
| 7 | 2,3 | 1,7 | 1,2 | 0,9 | 0,7 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 29, |
| 8 | 2,2 | 1,4 | 1,2 | 0,9 | 0,7 | 0,5 | 0,5 | 0,4 | 2002 |
| 9 | 2,2 | 1,5 | 1,1 | 0,9 | 0,7 | 0,6 | 0,5 | 0,2 | |
| 5–9 | 11,6 | 8,1 | 6,1 | 4,5 | 3,4 | 2,5 | 2,1 | 1,4 | |
| Kaunas | | | | | | | | | |
| 5 | 2,5 | 1,8 | 1,1 | 0,8 | 0,6 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | |
| 6 | 2,2 | 1,5 | 1,1 | 0,8 | 0,6 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | |
| 7 | 2,3 | 1,6 | 1,0 | 0,8 | 0,6 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 19, |
| 8 | 2,0 | 1,4 | 1,2 | 0,9 | 0,7 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 1999 |
| 9 | 2,1 | 1,4 | 1,0 | 0,8 | 0,6 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | |
| 5–9 | 11,0 | 7,8 | 5,5 | 4,2 | 3,2 | 2,1 | 1,6 | 1,2 | |
| Raseiniai | | | | | | | | | |
| 5 | 2,6 | 1,8 | 1,2 | 0,9 | 0,7 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | |
| 6 | 2,1 | 1,5 | 1,2 | 0,8 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | |
| 7 | 2,0 | 1,5 | 1,1 | 0,9 | 0,6 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 32, |
| 8 | 2,0 | 1,4 | 1,1 | 0,8 | 0,7 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 2002 |
| 9 | 1,9 | 1,2 | 0,9 | 0,7 | 0,5 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | |
| 5–9 | 10,5 | 7,3 | 5,5 | 4,1 | 3,1 | 2,3 | 1,8 | 1,3 | |

| Mėn. | 3 d. | 4 d. | 5 d. | 6 d. | 7 d. | 8 d. | 9 d. | 10 d. | Maks. |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| Lazdijai | | | | | | | | | |
| 5 | 2,5 | 1,9 | 1,2 | 0,8 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | |
| 6 | 2,4 | 1,5 | 1,0 | 0,8 | 0,6 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | |
| 7 | 2,2 | 1,5 | 1,2 | 0,8 | 0,6 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 28, |
| 8 | 2,4 | 1,6 | 1,2 | 0,9 | 0,7 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 1994 |
| 9 | 2,2 | 1,5 | 1,2 | 0,9 | 0,7 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | |
| 5–9 | 11,5 | 7,9 | 5,7 | 4,2 | 3,1 | 2,3 | 1,7 | 1,2 | |
| Utena | | | | | | | | | |
| 5 | 2,4 | 1,7 | 1,3 | 0,9 | 0,7 | 0,6 | 0,3 | 0,2 | |
| 6 | 2,2 | 1,5 | 1,0 | 0,7 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | |
| 7 | 2,2 | 1,6 | 1,1 | 0,8 | 0,7 | 0,6 | 0,4 | 0,2 | 26, |
| 8 | 2,2 | 1,6 | 1,2 | 0,9 | 0,6 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 1982 |
| 9 | 1,9 | 1,4 | 1,1 | 0,9 | 0,7 | 0,6 | 0,5 | 0,3 | |
| 5–9 | 11,0 | 7,8 | 5,7 | 4,2 | 3,2 | 2,6 | 1,8 | 1,3 | |
| Varėna | | | | | | | | | |
| 5 | 2,4 | 1,8 | 1,2 | 0,9 | 0,6 | 0,4 | 0,4 | 0,3 | |
| 6 | 2,3 | 1,5 | 1,1 | 0,9 | 0,7 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | |
| 7 | 2,2 | 1,6 | 1,1 | 0,8 | 0,6 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 20, |
| 8 | 2,4 | 1,8 | 1,3 | 1,0 | 0,8 | 0,6 | 0,5 | 0,4 | 1999 |
| 9 | 2,1 | 1,6 | 1,3 | 0,9 | 0,8 | 0,6 | 0,5 | 0,3 | |
| 5–9 | 11,4 | 8,3 | 6,0 | 4,4 | 3,5 | 2,7 | 2,0 | 1,5 | |



3.22 pav. 0–20 cm dirvožemio sluoksnio drėgmės pokytis (y ašis) esant 3, 5 ir 10 dienų be kritulių laikotarpiams ir prieš tai buvęs drėgmės kiekis (x ašis) 1951–2020 metų gegužės–rugsėjo mėnesiais. Visi R^2 yra statistškai reikšmingi pagal $p < 0,05$, išskyrus 10 dienų be kritulių buvusius atvejus Utenoje ir Raseiniuose.



3.23 pav. Vidutinis 0–20 cm dirvožemio sluoksnio drėgmės pokytis per įvairius laikotarpius be kritulių priklausomai nuo prieš periodą be kritulių buvusios dirvožemio drėgmės (spalvotos linijos, legenda) 1951–2020 metų gegužės–rugsėjo mėnesiais.

Prieš nelietingą laikotarpį buvusios dirvožemio drėgmės ryšys su drėgmės pokyčiais po jo pasižymi mažesniu determinacijos koeficientu R^2 (3.22 pav.), palyginti su gausių kritulių nulemtais drėgmės pokyčiais (3.20 pav.). Tai susiję su tuo, kad gausių kritulių poveikis dirvožemio drėgmei yra gana staigus – per parą ar dvi, o nelietingo laikotarpio poveikis išsitęsia laikui bėgant. Dėl to laikotarpį be kritulių poveikis drėgmei gali priklausyti nuo dar vieno veiksnio – oro temperatūros, kuri lemia drėgmės netektį garuojant.

Apibendrinant galima teigti, kad gausių kritulių ir periodų be kritulių poveikis dirvožemio drėgmei priklauso nuo prieš reiškinį buvusios drėgmės bei dirvožemio granulometrinės sudėties. Taip pat svarbus yra gausių kritulių kiekis ir periodų be kritulių trukmė.

3.5. Dirvožemio drėgmė ekstremalių meteorologinių sąlygų metu

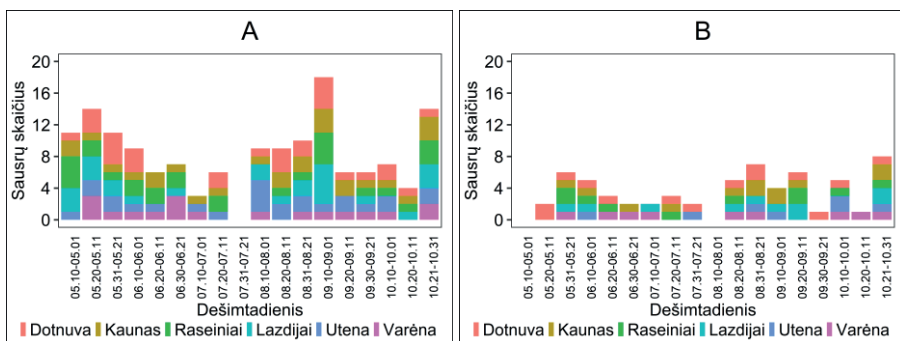
Šiame poskyryje analizuojamos sausras, ilgi lietingi laikotarpiai ir jų metu buvusi dirvožemio drėgmė. Taip pat pagal dirvožemio drėgmę išskirti sausi ir drėgni periodai, leidžiantys identifikuoti ekstremalias drėgmės sąlygas.

3.5.1. Sausros pagal TPI30 ir sausi periodai dirvožemyje

Dirvožemio drėgmė sausrų metu yra svarbus dydis, apibūdinantis sausras poveikį. Šiuo metu sausras identifikuojamos tik pagal meteorologinius rodiklius, o dirvožemio drėgmė nėra matuojama. Todėl lieka neviseškai aišku, kiek yra tinkami meteorologiniai sausrų indeksai agrometeorologinėms sausroms identifikuoti. Šiame poskyryje analizuojama dirvožemio drėgmė sausrų pagal TPI15 ir TPI30 indeksus metu bei išskiriami sausi periodai dirvožemyje tik remiantis drėgmės modeliavimo SWAP modeliu rezultatais.

Sausrų skaičius ir pasikartojimas. Iš 70-ies analizuojamų metų pagal TPI15 bent vienoje stotyje (iš šešių) sausra fiksuota 43 metus, o pagal TPI30 – du kartus mažiau (22 metus).

24 metus TPI15 sausra fiksuota Dotnuvoje, Kaune, Raseiniuose ir Utenoje, Lazdijuose 21 metus, o mažiausiai Varėnoje (15). Daugiausia metų su TPI30 sausra fiksuota Dotnuvoje (13) ir Kaune (12), Lazdijuose (10), Varėnoje ir Raseiniuose po 9 metus, o mažiausiai Utenoje (7). Raseiniuose ir Dotnuvoje 2000 metais fiksuoti 2 atskiri sausrų laikotarpiai (vienas vegetacijos sezono pradžioje, kitas – pabaigoje). Visose šešiose analizuojamose stotyse sausra fiksuota 1993 ir 2000 metais, o penkiose – 1971 ir 1994 metais (3.8 lentelė).



3.24 pav. Sausrų skaičius pagal TPI15 (A) ir TPI30 (B) visose šešiose meteorologijos stotyse atskirais dešimtadieniais 1951–2020 metais. Kiekviena sausra priskirta dešimtadieniui pagal sausras vidurinę datą.

3.8 lentelė. Stichinės sausras pagal TPI30 ir sumodeliuotos 0–20 cm dirvožemio sluoksnio drėgmės reikšmės: minimali, mediana bei pirmą sausras dieną buvusi dirvožemio drėgmė (mm) 1951–2020 metais.

| Metai | Stotis | Sausros | | | Drėgmės reikšmė | | |
|-------|-----------|-------------|--------|------|-----------------|----------|--|
| | | Pr.-pab. | Trukmė | Min. | Med. | Pirmą d. | |
| 1951 | Kaunas | 10.12–10.30 | 19 | 32,3 | 33,9 | 32,3 | |
| | Lazdijai | 10.13–10.29 | 17 | 14,2 | 15,9 | 14,2 | |
| | Utena | 10.05–10.15 | 11 | 18,8 | 18,9 | 19,1 | |
| 1955 | Varėna | 09.30–10.16 | 17 | 15,4 | 21,0 | 15,4 | |
| | Raseiniai | 09.03–09.28 | 26 | 31,1 | 33,5 | 35,8 | |
| | Lazdijai | 08.19–10.05 | 48 | 8,6 | 10,8 | 8,7 | |
| 1964 | Varėna | 07.09–07.10 | 2 | 10,6 | 12,8 | 10,6 | |
| | Lazdijai | 06.27–07.19 | 23 | 9,0 | 10,3 | 10,0 | |
| 1967 | Kaunas | 08.04–08.25 | 22 | 27,7 | 32,3 | 27,9 | |
| 1969 | Utena | 08.24–08.29 | 6 | 12,3 | 15,7 | 12,3 | |
| | Dotnuva | 08.29–08.30 | 2 | 32,7 | 32,8 | 33,0 | |
| 1971 | Kaunas | 08.25–09.05 | 12 | 26,4 | 32,3 | 26,7 | |
| | Lazdijai | 08.23–09.06 | 15 | 9,0 | 12,9 | 9,1 | |
| | Raseiniai | 06.08–06.19 | 12 | 36,9 | 40,2 | 39,7 | |
| | Varėna | 08.21–09.10 | 21 | 8,8 | 16,1 | 8,9 | |
| 1976 | Varėna | 10.09–10.15 | 7 | 23,9 | 24,4 | 24,6 | |
| 1979 | Kaunas | 06.25–07.03 | 9 | 29,5 | 32,2 | 30,1 | |
| 1982 | Dotnuva | 08.17–08.25 | 9 | 37,1 | 58,6 | 37,1 | |
| | Lazdijai | 09.12–09.13 | 2 | 19,0 | 29,4 | 19,0 | |
| 1983 | Kaunas | 09.01–09.16 | 16 | 25,7 | 37,2 | 25,8 | |
| | Dotnuva | 05.08–05.25 | 18 | 47,8 | 51,4 | 51,6 | |
| 1992 | Dotnuva | 07.04–08.06 | 34 | 27,9 | 30,8 | 30,3 | |
| | Kaunas | 06.29–08.03 | 36 | 24,9 | 27,3 | 28,1 | |
| | Utena | 07.03–08.23 | 52 | 9,2 | 10,5 | 11,3 | |
| 2008 | Raseiniai | 07.12–07.24 | 13 | 30,5 | 35,3 | 30,5 | |
| | Dotnuva | 06.02–06.13 | 12 | 38,2 | 41,9 | 44,1 | |
| | Kaunas | 05.25–06.09 | 16 | 39,9 | 48,2 | 52,5 | |
| 1993 | Lazdijai | 05.28–05.28 | 1 | 14,5 | 14,5 | 14,5 | |
| | Utena | 05.26–06.10 | 16 | 18,8 | 27,3 | 20,7 | |
| | Raseiniai | 06.01–06.11 | 11 | 36,6 | 39,7 | 42,6 | |
| 2006 | Varėna | 05.27–05.29 | 3 | 23,7 | 25,4 | 25,4 | |

| Metai | Stotis | Sausros | | | Drėgmės reikšmė | | |
|-------|-----------|-------------|--------|------|-----------------|----------|--|
| | | Pr.-pab. | Trukmė | Min. | Med. | Pirmą d. | |
| 1994 | Dotnuva | 08.04–09.02 | 30 | 28,5 | 33,5 | 28,5 | |
| | Kaunas | 08.08–09.03 | 27 | 26,0 | 32,3 | 26,0 | |
| | Lazdijai | 08.04–09.02 | 30 | 8,7 | 12,3 | 8,7 | |
| 1996 | Raseiniai | 08.05–09.04 | 31 | 25,8 | 32,0 | 26,3 | |
| | Varėna | 08.06–08.19 | 13 | 11,5 | 29,5 | 11,7 | |
| | Dotnuva | 09.09–09.29 | 21 | 41,0 | 43,7 | 41,7 | |
| 2000 | Kaunas | 09.14–09.21 | 8 | 38,2 | 42,9 | 38,2 | |
| | Utena | 08.30–09.16 | 18 | 10,0 | 17,6 | 10,7 | |
| | Dotnuva | 05.14–05.26 | 13 | 43,2 | 56,5 | 46,4 | |
| | Kaunas | 10.26–10.31 | 6 | 66,4 | 67,7 | 66,4 | |
| 2002 | Kaunas | 10.18–10.31 | 14 | 39,9 | 41,0 | 39,9 | |
| | Lazdijai | 10.27–10.31 | 5 | 19,3 | 19,7 | 19,3 | |
| | Utena | 10.29–10.31 | 3 | 50,9 | 51,8 | 51,8 | |
| | Raseiniai | 05.15–06.05 | 22 | 41,8 | 45,7 | 46,6 | |
| 2002 | Varėna | 10.23–10.31 | 9 | 49,9 | 64,8 | 49,9 | |
| | Dotnuva | 09.12–10.07 | 26 | 30,6 | 36,7 | 30,6 | |
| | Kaunas | 08.26–09.19 | 25 | 24,5 | 32,1 | 24,6 | |
| 2005 | Lazdijai | 09.01–09.20 | 20 | 9,0 | 10,7 | 9,4 | |
| | Raseiniai | 08.29–10.05 | 38 | 25,6 | 30,3 | 25,6 | |
| | Dotnuva | 10.05–10.12 | 8 | 55,4 | 56,0 | 57,6 | |
| 2006 | Utena | 10.07–10.10 | 4 | 38,0 | 38,2 | 38,4 | |
| | Raseiniai | 10.06–10.13 | 8 | 37,8 | 38,3 | 39,6 | |
| 2008 | Dotnuva | 07.17–08.02 | 17 | 26,7 | 32,0 | 28,6 | |
| | Dotnuva | 06.12–06.20 | 9 | 40,2 | 48,8 | 40,8 | |
| 2018 | Lazdijai | 06.01–06.02 | 2 | 10,3 | 15,1 | 10,3 | |
| | Varėna | 06.16–07.05 | 20 | 9,6 | 11,8 | 10,6 | |
| 2019 | Dotnuva | 05.14–05.28 | 15 | 46,2 | 48,6 | 51,6 | |
| | Kaunas | 05.14–06.05 | 23 | 35,5 | 42,5 | 47,0 | |
| | Raseiniai | 05.23–05.23 | 1 | 44,2 | 44,2 | 44,2 | |
| 2020 | Varėna | 05.15–07.08 | 55 | 8,8 | 12,2 | 18,2 | |

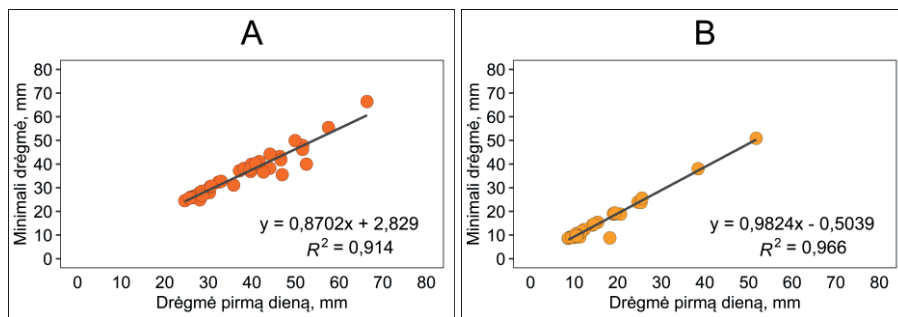
TPI30 sausros ilgiausiai truko Utenoje (52 dienos 1992 metais) bei Varėnoje (55 dienos 2019 metais) (3.8 lentelė). Net ir 1 dieną trukusios stichinės sausros vertinti kaip mažai reikšmingos negalima, nes TPI30 indeksas atspindi paskutinių buvusių 59-ių dienų temperatūros ir kritulių sąlygas. Sausrų pasikartojimas ir trukmė pasižymi tam tikru sezoniškumu. Sausros daugiausia fiksuotos tiriamo sezono pradžioje (gegužės pabaigoje–birželio viduryje) bei rugpjūčio pabaigoje–rugsėjo viduryje (3.24 pav.).

Sausra pagal TPI15 visada prasideda anksčiau stichinės sausros pagal TPI30 (išskyrus 1951 metų spalio mėnesį Kaune, kai TPI15 ir TPI30 sausra prasidėjo tą pačią dieną). Vidutiniškai TPI30 sausra prasideda po 10–12 dienų nuo TPI15 sausros pradžios. O dažniausiai baigiasi vidutiniškai 4–7 dienomis vėliau po TPI15 sausros pabaigos.

Dirvožemio drėgmė sausrų metu. Didžiausią pavojų kelia stichinės sausros. Dirvožemio drėgmė sausrų, identifikuotų pagal TPI30, metu priklauso tiek nuo sausros intensyvumo, tiek nuo dirvožemio tipo. Nustatyta, kad daugumos sausrų minimalios dirvožemio drėgmės reikšmės yra artimos pirmos sausros dienos drėgmės reikšmei ir skirtumas tarp jų siekia vos kelis mm (3.9 lentelė, 3.25 pav.). Tai rodo, kad pirma TPI30 sausros diena dažniausia identifikuojama tuomet, kai dirvožemio drėgmė jau beveik pasiekė minimumą ir sausra yra pasiekusi piką.

3.9 lentelė. Minimalios ir pirmos sausros dienos 0–20 cm dirvožemio sluoksnio drėgmės mediana (mm) sausrų pagal TPI15 ir TPI30 metu 1951–2020 metais.

| Dirvožemiai | Stotis | TPI15 | | TPI30 | |
|--------------|-----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | Minimali | Pirmą dieną | Minimali | Pirmą dieną |
| Priemolingi | Dotnuva | 40,5 | 43,2 | 39,2 | 41,3 |
| | Kaunas | 31,7 | 35,6 | 28,6 | 29,1 |
| | Raseiniai | 36,9 | 42,3 | 36,7 | 39,6 |
| | Pagal trijų stočių duomenis | 36,3 | 38,6 | 36,1 | 37,6 |
| Priesmėlingi | Lazdijai | 12,3 | 13,9 | 9,7 | 10,1 |
| | Utena | 13,5 | 14,0 | 18,8 | 19,1 |
| | Varėna | 12,9 | 16,0 | 11,5 | 15,4 |
| | Pagal trijų stočių duomenis | 13,3 | 14,7 | 11,9 | 13,3 |

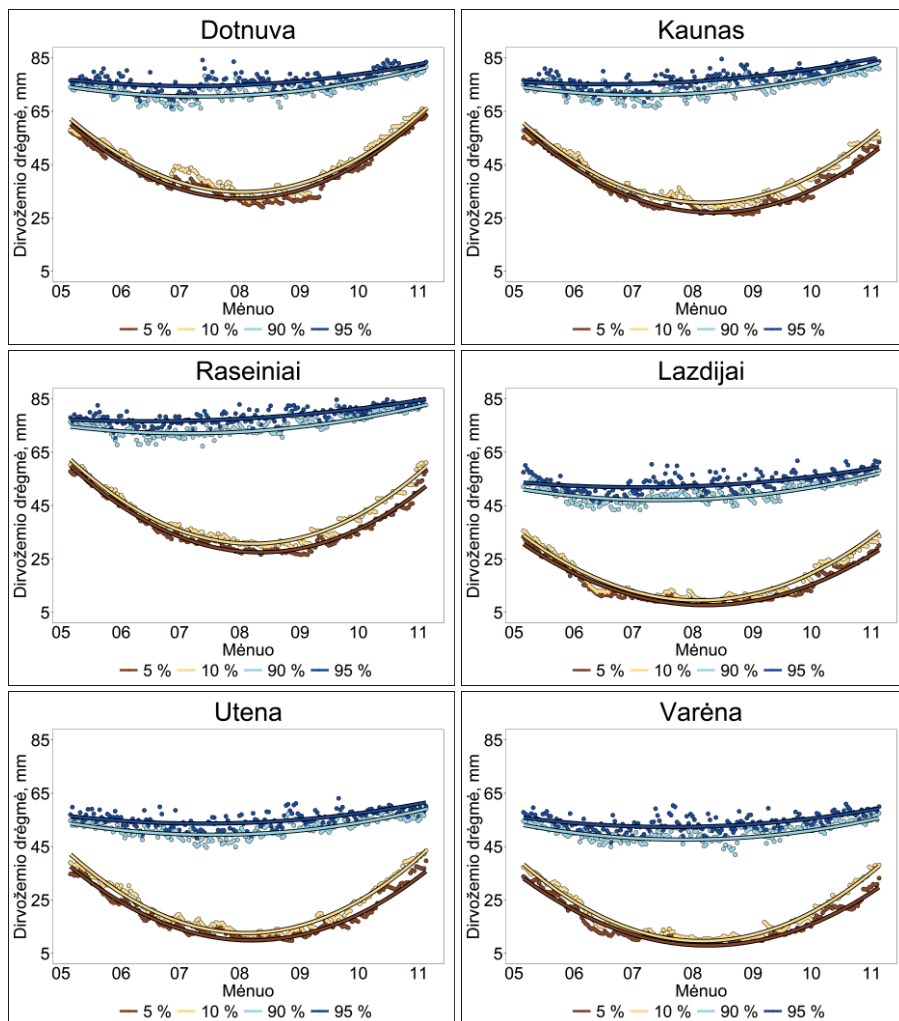


3.25 pav. 0–20 cm dirvožemio sluoksnio drėgmė pirmą sausros pagal TPI30 dieną ir minimali drėgmės reikšmė visos sausros metu priemolinguose (A) ir priesmėlinguose (B) dirvožemiuose 1951–2020 metais.

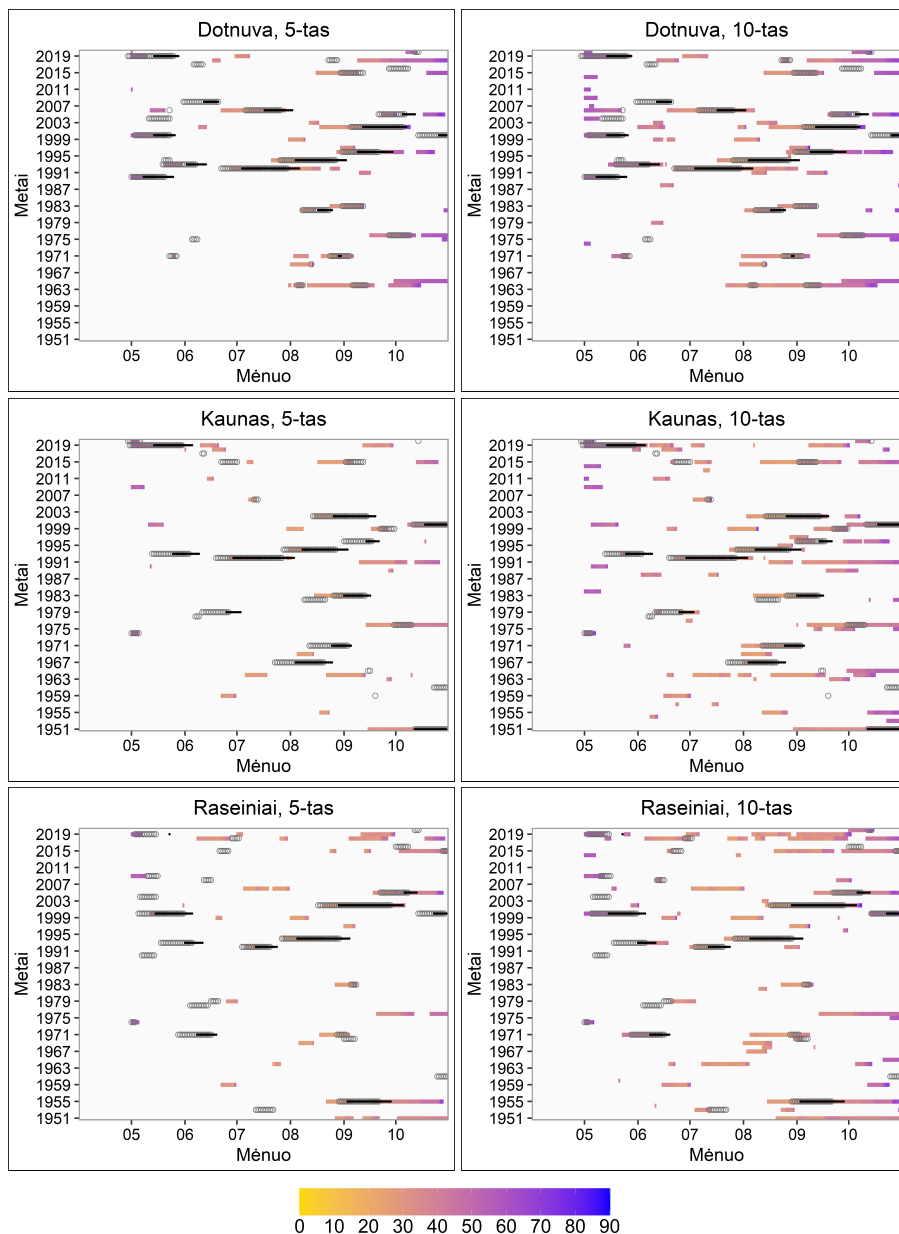
Priemolinguose dirvožemiuose TPI30 sausrų metu buvusios minimalios drėgmės mediana siekia 36 mm, o pirmos dienos mediana – 38 mm. Priesmėlinguose dirvožemiuose – atitinkamai 12 ir 13 mm (3.9 lentelė). Šios reikšmės artimos dirvožemio drėgmės skirstinio 10-to procentilio vertei, kuri priemolinguose dirvožemiuose atitinka 38 mm, o priesmėlinguose – 15 mm (3.13 pav., 3.14 pav.). 5-to procentilio vertės yra kiek mažesnės (atitinkamai 33 ir 12 mm). Todėl skirstinio procentilių reikšmes taip pat galima naudoti identifikuojant sausras.

Atkreiptinas dėmesys, kad toliau tekste terminas *sausra* vartojamas sausrai pagal TPI15 ir TPI30 (temperatūros ir kritulių) indeksus apibūdinti, o *sausi periodai dirvožemyje* – sausoms sąlygoms, išskirtoms pagal dirvožemio drėgmę.

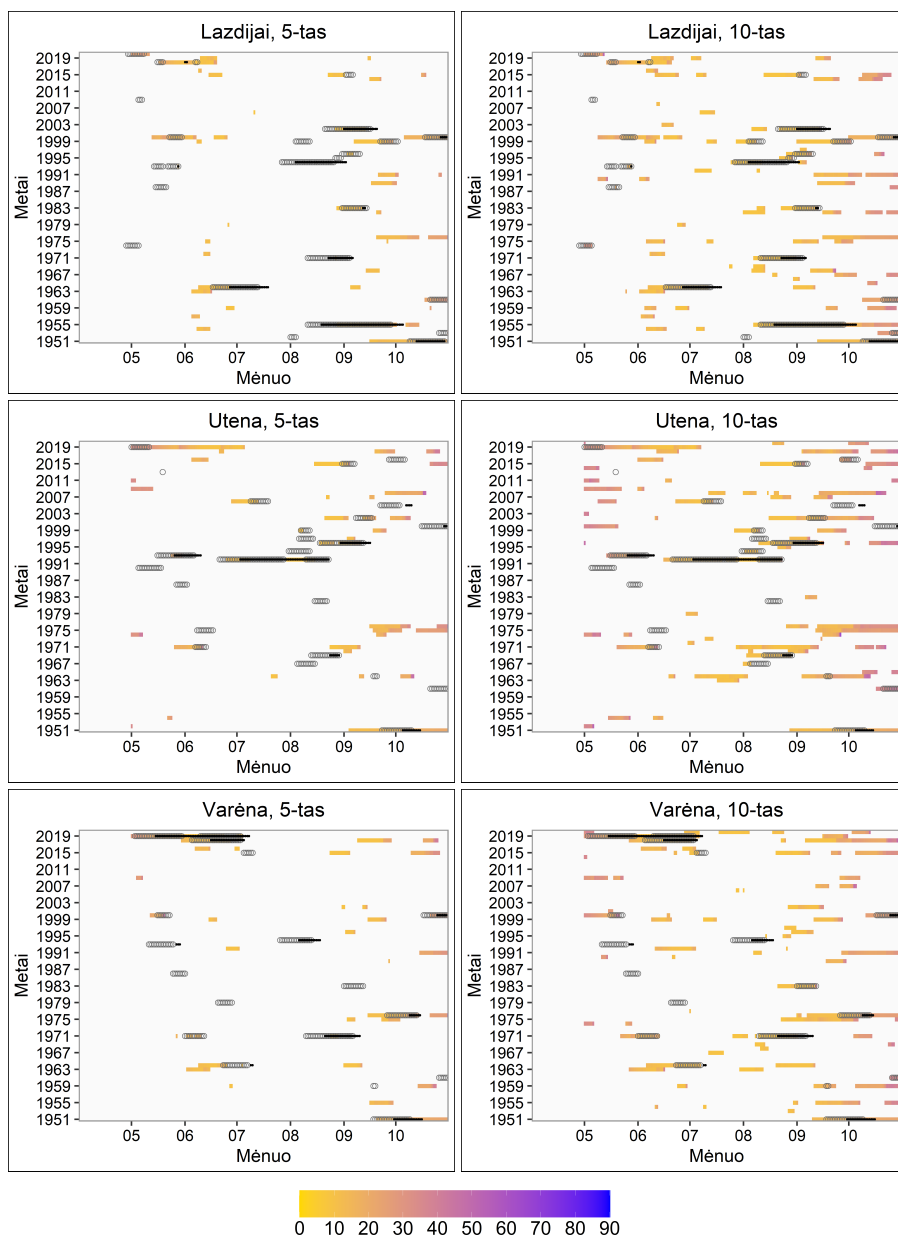
3.9 lentelėje pateikiamos TPI15 minimalios ir pirmą sausros dieną buvusios drėgmės reikšmių medianos dažniausiai yra didesnės nei TPI30. Dirvožemio drėgmė pavasario ir rudens sausrų pagal TPI30 metu tiek lengvesniuose (priesmėlinguose), tiek sunkesniuose (priemolinguose) dirvožemiuose yra didesnė nei sezono viduryje (3.29 pav.). Pavasarį dirvožemio drėgmė yra didesnė, nes dirvožemis po žiemos dar yra prisotintas sniego tirpsmo vandens, o rudenį dirvožemio drėgmė didesnė dėl žemėjančios oro temperatūros ir mažėjančio išgaravimo. Vis dėlto, šis drėgmės pasiskirstymo sausros metu sezoniškumas ryškesnis priemolinguose nei priesmėlinguose dirvožemiuose.



3.26 pav. 0–20 cm dirvožemio sluoksnio drėgmės skirstinio 5-to, 10-to ir 90-to bei 95-to procentilių reikšmes aproksimuojančios regresijos kreivės. Atitinkamos spalvos taškais pažymėtos kasdienės drėgmės reikšmės.



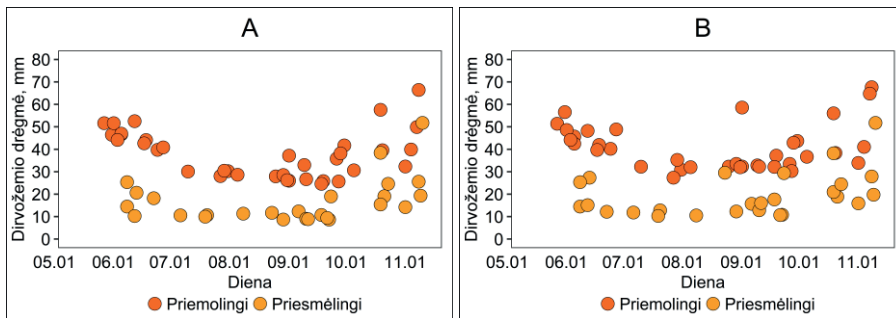
3.27 pav. 0–20 cm dirvožemio sluoksnio drėgmė sausų periodų dirvožemyje metu (spalvota skalė, mm). Sausi periodai išskirti pagal 5-to (kairėje) ir 10-to (dešinėje) dirvožemio drėgmės reikšmių skirstinio procentilio ribas priemolinguose dirvožemiuose 1951–2020 metais. Tuščiaviduriais taškais pažymėtos sausros pagal TPI15, o pilnaviduriais – sausros pagal TPI30.



3.28 pav. 0–20 cm dirvožemio sluoksnio drėgmė sausų periodų dirvožemyje metu (spalvota skalė, mm). Sausi periodai išskirti pagal 5-to (kairėje) ir 10-to (dešinėje) dirvožemio drėgmės reikšmių skirstinio procentilio ribas priesmėlinguose dirvožemiuose 1951–2020 metais. Tuščiaviduriais taškais pažymėtos sausros pagal TPI15, o pilnaviduriais – sausros pagal TPI30.

Sausi periodai dirvožemyje. Dėl dirvožemio drėgmės sezoniškumo net ir sausų metų dirvožemio drėgmės procentilio riba identifikuojant sausus periodus dirvožemyje turi būti parinkta, atsižvelgiant į skirstinio sezoniškumą. Taip pat ribos turi būti individualiai pritaikytos kiekvienam analizuojamam taškui atskirai, nes dirvožemiai pasižymi nevienodomis savybėmis (3.26 pav.).

Sausiems periodams dirvožemyje išskirti naudojamos kasdienės dirvožemio drėgmės skirstinio 5-to ir 10-to procentilio reikšmės, nustatytos pagal 1951–2020 metų gegužės–spalio mėnesio duomenis. Sausi periodai dirvožemyje (3.27 pav., 3.28 pav.) buvo išskirti, kai 10 dienų dirvožemio drėgmės slenkantis vidurkis pasiekia ar nukrinta žemiau 5-to ir 10-to procentilio ribos (3.26 pav.).



3.29 pav. 0–20 cm dirvožemio sluoksnio drėgmė skirtinguose dirvožemiuose pirmą TPI30 sausros dieną (A) ir drėgmės mediana visos sausros metu (B) 1951–2020 metais. X ašyje data – vidurinė sausros diena.

Sausų periodų dirvožemyje pagal 10-tą procentilį atskirose stotyse fiksuota po 5–6 kartus per 10 metų, o pagal 5-tą – 3–4 kartus per 10 metų. Taip pat buvo metų, kai pasitaikė keli sausri periodai dirvožemyje toje pačioje stotyje (3.10 lentelė).

Sausų periodų dirvožemyje trukmės medianos pagal 10-tą ir 5-tą procentilius yra artimos (apie 8–12 dienų) (3.10 lentelė), o visose stotyse, išskyrus Uteną ir Varėną, sausri pagal TPI15 trukmės mediana yra iki 5 dienų trumpesnė nei TPI30. Tai gali būti susiję su tuo, kad TPI15 atspindi trumpesnį laikotarpio kritulių ir temperatūros santykį nei TPI30, todėl yra mažiau inertiškas pokyčiams.

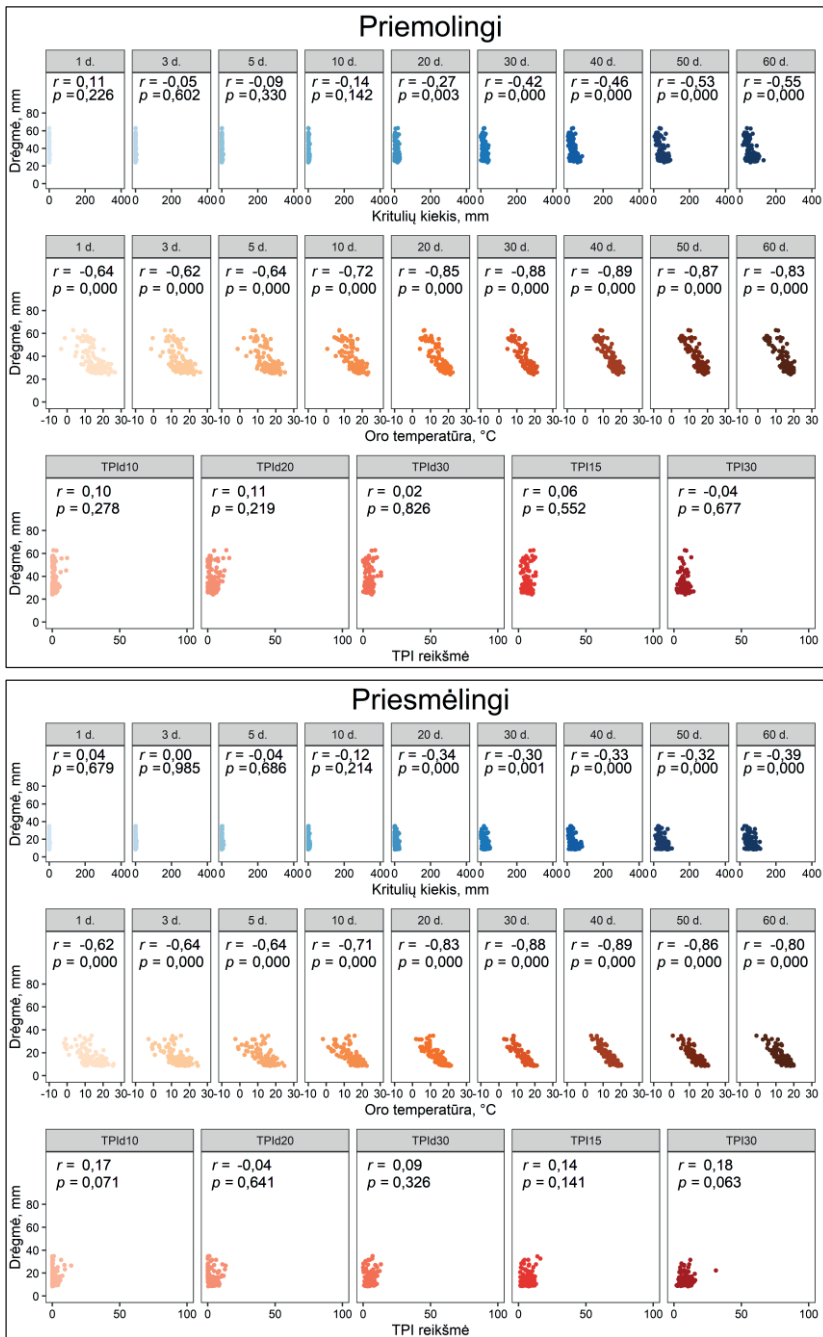
3.10 lentelė. Sausų periodų dirvožemyje ir sausrų pagal TPI15, TPI30 skaičiaus ir trukmės per dešimtmetį rodikliai 1951–2020 metais.

| Stotis Rodiklis \ procentilis | Dotnuva | | Kaunas | | Raseiniai | | Lazdijai | | Utena | | Varėna | |
|--|---------|------|--------|-----|-----------|------|----------|-----|-------|-----|--------|-----|
| | 10 | 5 | 10 | 5 | 10 | 5 | 10 | 5 | 10 | 5 | 10 | 5 |
| Sausų periodų dirvožemyje skaičius | 9,5 | 7,6 | 11,1 | 5,4 | 9,1 | 5,1 | 11,6 | 6,1 | 10,6 | 5,6 | 10,9 | 5,1 |
| Metų skaičius su sausais periodais dirvožemyje | 5,9 | 4,5 | 6,0 | 3,7 | 5,3 | 3,1 | 6,3 | 4,4 | 5,7 | 3,4 | 5,3 | 2,9 |
| Metų skaičius su keliais sausais periodais dirvožemyje | 2,9 | 2,2 | 3,1 | 1,3 | 2,1 | 1,3 | 3,1 | 1,4 | 3,1 | 1,7 | 3,4 | 1,7 |
| Sauso periodo dirvožemyje trukmės mediana | 12,0 | 11,0 | 11,0 | 9,5 | 12,0 | 10,5 | 9,0 | 8,0 | 11,0 | 9,0 | 9,0 | 9,0 |
| Sausrų pagal TPI15 skaičius | 5,0 | | 3,7 | | 3,9 | | 3,6 | | 3,6 | | 2,6 | |
| Metų skaičius su sausra pagal TPI15 | 4,1 | | 3,4 | | 3,4 | | 3,0 | | 3,4 | | 2,1 | |
| Metų skaičius su keliomis sausromis pagal TPI15 | 0,9 | | 0,3 | | 0,4 | | 0,6 | | 0,1 | | 0,4 | |
| Sausros pagal TPI15 trukmės mediana | 13,0 | | 12,0 | | 8,0 | | 9,0 | | 11,0 | | 15,0 | |
| Sausrų pagal TPI30 skaičius | 2,4 | | 1,7 | | 1,4 | | 1,4 | | 1,0 | | 1,3 | |
| Metų skaičius su sausra pagal TPI30 | 2,2 | | 1,7 | | 1,3 | | 1,4 | | 1,0 | | 1,3 | |
| Metų skaičius su keliomis sausromis pagal TPI30 | 0,2 | | 0,0 | | 0,1 | | 0,0 | | 0,0 | | 0,0 | |
| Sausros pagal TPI30 trukmės mediana | 14,0 | | 17,5 | | 12,5 | | 16,0 | | 11,0 | | 13,0 | |

Vertinant, kaip sausi periodai dirvožemyje sutampa su sausromis pagal TPI15 ir TPI30, nustatyta, kad daugiau TPI30 sausrų buvo identifikuota pagal 10-tą procentilį nei pagal 5-tą. Net 26 % (16 sausrų) TPI30 sausrų nebuvo identifikuotos pagal 5-tą dirvožemio drėgmės procentilį, nors pagal 10-tą – vos 8 % (5 sausros) (3.11 lentelė), iš kurių dvi buvo spalio mėnesį ir po vieną gegužės, birželio ir rugpjūčio mėnesiais. TPI15 sausrų buvo neidentifikuota daugiau ir ypač tų, kurios neevoliucionavo į sausras pagal TPI30.

3.11 lentelė. Identifikuotų (+) ir neidentifikuotų (-) TPI30 sausrų skaičius taikant sauso periodo dirvožemyje kriterijų pagal 5-tą ir 10-tą procentilius 1951–2020 metais. Prie meteorologijos stoties pavadinimo pateiktas sausrų pagal TPI30 skaičius.

| Drėgmės procentilis | Ident.+ neident.- | Dotnuva (14) | Kaunas (12) | Raseiniai (10) | Lazdijai (10) | Utena (7) | Varėna (9) | Iš viso (62) |
|---------------------|-------------------|--------------|-------------|----------------|---------------|-----------|------------|--------------|
| 5-tas procentilis | + | 12 | 8 | 7 | 8 | 4 | 7 | 46 |
| | - | 2 | 4 | 3 | 2 | 3 | 2 | 16 |
| 10-tas procentilis | + | 13 | 12 | 10 | 10 | 5 | 7 | 57 |
| | - | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 | 5 |



3.30 pav. Ryšys tarp 0–20 cm dirvožemio sluoksnio drėgmės pirmą sauso periodo dirvožemyje dieną pagal 5-tą procentilį ir prieš tai buvusio kritulių kiekio, vidutinės oro temperatūros už 1–60 dienų laikotarpį bei kasdienių TPI indekso (TPI_{d10}, TPI_{d20}, TPI_{d30}, TPI₁₅, TPI₃₀) reikšmių 1951–2020 metų gegužės–spalio mėnesiais priemolinguose ir priesmėlinguose dirvožemiuose.

Nors TPI15 ir TPI30 sausros geriau identifikuojamos pagal 10-tą procentilį, tačiau taip pat atsiranda papildomų sausų periodų, ypač truncančių vos kelias dienas, kai pagal 5-tą procentilį jų yra gerokai mažiau.

Taip pat nesutampa sausrų pagal TPI30 ir sausų periodų dirvožemyje pradžia ir pabaiga. Nustatyta, kad visose stotyse sausų periodų dirvožemyje (pagal 5-tą procentilį) pradžia buvo apie 10 dienų ankstesnė (pagal medianą) nei TPI15 sausros (iš 54 sutampančių sausų periodų dirvožemyje ir sausrų atvejų) ir apie 12 dienų anksčiau nei TPI30 sausros (iš 41 atvejo). Sausų periodų pradžia pagal 10-tą procentilį nustatyta atitinkamai vidutiniškai 9 (95 atvejai) ir 15 dienų anksčiau (51 atvejais) nei TPI15 ir TPI30 sausrų pradžia. Būtina paminėti, jog fiksuota ir tokių atvejų, kai sausi periodai dirvožemyje pagal 5-tą ir 10-tą procentilius buvo identifikuoti 2–4 dienomis vėliau, nei prasidėjo TPI30 sausra.

Tiek pagal 5-tą, tiek pagal 10-tą procentilį dirvožemio drėgmė pirmą išskirtų sausų periodų dirvožemyje dieną stipriausiai ir statistiškai reikšmingai siejasi su prieš tai buvusio laikotarpio vidutine oro temperatūra, o ypač su prieš tai buvusią 20–40 dienų vidutine oro temperatūra ($r = -0,83 - -0,95$) tiek priemolinguose, tiek priemolinguose dirvožemiuose (3.30 pav., 5 priedas, 6 priedas). Esminių skirtumų tarp to, kokios sąlygos yra palankios sausų periodų dirvožemyje formavimuisi priemolinguose ir priemolinguose dirvožemiuose, nenustatyta. Kritulių kiekis yra taip pat svarbus veiksnys, tačiau sausi periodai įprastai formuojasi tada, kai kritulių kiekis mažas, todėl koreliuojant statistiškai svarbesniu veiksnium tampa oro temperatūros reikšmės.

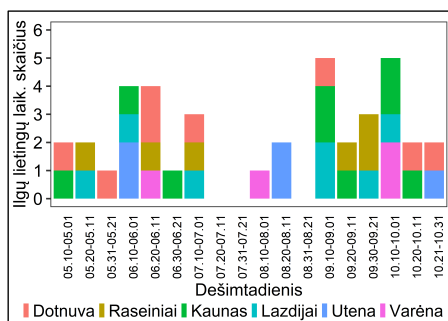
3.5.2. Ilgi lietingi laikotarpiai ir drėgni periodai dirvožemyje

Lietuvoje ilgas lietingas laikotarpis išskiriamas naudojant daugiametį (1971–2020 metų) 60 dienų kritulių sumos kiekvienos dienos vidurkį bei šių dienų vidutinį kvadratinį nuokrypį. Dieną, kai 60 dienų kritulių suma yra $\geq 2,8$ standartinio kvadratinio nuokrypio didesnė už daugiametį vidurkį, fiksuojama ilgo lietingo laikotarpio pradžia, o pabaiga skelbiama praėjus 30 dienų (Lietuvos Respublikos..., 2020). Šiame poskyryje analizuojama sumodeliuota dirvožemio drėgmė, buvusi ilgų lietingų laikotarpių metu. Tyrime analizuotos tik tos dienos, kai 60 dienų kritulių suma buvo didesnė nei numatytas rodiklis, o papildomos 30 dienų po reiškinio nėra įtrauktos. Kadangi ilgi lietingi laikotarpiai dažnai suskyla į atskiras dalis, analizuojant jie buvo jungiami į vieną reiškinį.

Ilgų lietingų laikotarpių skaičius ir pasikartojimas. Analizuojamu laikotarpiu nustatyti 23 metai, kai buvo fiksuotas ilgas lietingas laikotarpis bent vienoje stotyje. Atskirose stotyse metų su ilgu lietingu laikotarpiu skaičius nėra vienodas: Utenoje 4, Varėnoje 5 metai, Raseiniuose ir Lazdijuose 6, Dotnuvoje 8, o daugiausia Kaune – 9 (3.12 lentelė). Daugelį metų reiškinys buvo fiksuotas tik vienoje stotyje. Tačiau 1954, 1983, 1994, 2005, 2010 ir 2020 metais ilgas lietingas laikotarpis fiksuotas 2 stotyse, 1957, 1962 ir 2006 metais 3 stotyse, o 1960 metais reiškinys fiksuotas 4 stotyse (3.12 lentelė). Du visiškai atskiri ilgi lietingi laikotarpiai, tarp kurių būtų bent 60 dienų laikotarpis, nustatyti tik 2010 metais Lazdijuose

Atskirų ilgo lietingo reiškinio periodų trukmė skiriasi. Ilgiausia reiškinio trukmė užfiksuota 1954 metais Kaune (3.12 lentelė).

Daugiausia ilgo lietingo laikotarpio reiškinio atvejų ir dienų su juo visose stotyse fiksuota birželio, rugsėjo mėnesiais ir spalio 1 dešimtadienį (3.31 pav.).



3.31 pav. Ilgų lietingų laikotarpių skaičius stotyse atskirais dešimtadieniais 1951–2020 metais. Kiekvieno reiškinio data pažymėta pagal tą dešimtadienį, į kurį patenka reiškinio vidurinė data.

Dirvožemio drėgmė ilgų lietingų laikotarpių metu. Nustatyta, kad visose priemolingo dirvožemio stotyse pirmą dieną fiksuota dirvožemio drėgmė artima drėgmės maksimumui per visą lietingą laikotarpį (82,5 ir 85,5 mm) (3.13 lentelė, 3.32 pav.). Tai reiškia, kad pirma ilgo lietingo laikotarpio diena daugiausia identifikuota tuomet, kai dirvožemio drėgmė jau buvo pasiekusi maksimumą. Priemolinguose dirvožemiuose per visą ilgą lietingą laikotarpį buvusios drėgmės mediana siekė 77,6 mm, o priemėlinguose – 53,9 mm. Šios medianos artimos dirvožemio drėgmės skirstinių 90-tam ir 95-tam procentiliui, kuris priemolinguose dirvožemiuose atitinkamai yra 76 ir 79 mm, o priemėlinguose – 52 ir 56 mm (3.13 pav., 3.14 pav.). Atskirose priemolingo ir priemolingo dirvožemių stotyse 90-tas ir 95-tas procentiliai nuo šių pateiktų reikšmių skiriasi iki kelių mm

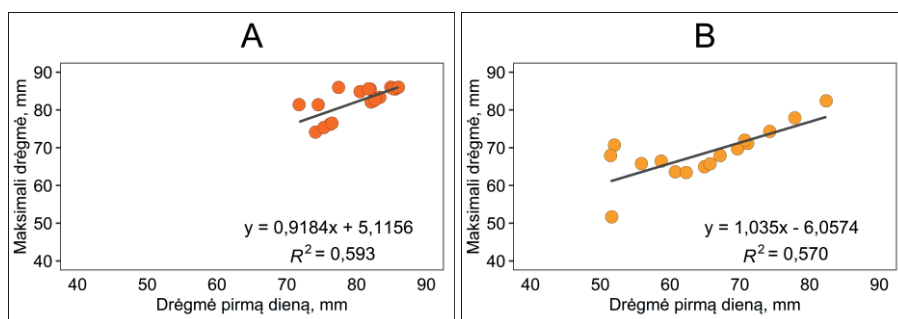
(3.13 lentelė). Galima teigti, kad procentilių vertės gali būti naudojamos išskiriant ne tik sausus, bet ir drėgnus periodus dirvožemyje.

3.12 lentelė. Ilgi lietingi laikotarpiai ir 0–20 cm dirvožemio sluoksnio drėgmės maksimali reikšmė, viso laikotarpio reikšmių mediana ir pirmą laikotarpio dieną buvusi dirvožemio drėgmė (mm) 1951–2020 metais.

| Metai | Stotis | Ilgas lietingas laikotarpis | | Drėgmės reikšmė | | |
|-------|-----------|-----------------------------|--------|-----------------|------|----------|
| | | Laikotarpis | Trukmė | Maks. | Med. | Pirmą d. |
| 1954 | Kaunas | 08.20–10.02 | 44 | 86,0 | 77,6 | 86,0 |
| | Raseiniai | 09.11–09.12 | 2 | 83,3 | 81,8 | 83,3 |
| 1957 | Kaunas | 09.28–10.11 | 14 | 82,5 | 76,4 | 82,5 |
| | Raseiniai | 09.18–10.11 | 24 | 85,6 | 80,2 | 85,2 |
| | Varėna | 09.25–10.14 | 20 | 65,7 | 54,7 | 65,7 |
| 1960 | Kaunas | 09.07–09.17 | 11 | 86,0 | 76,1 | 86,0 |
| | Lazdijai | 08.19–09.17 | 30 | 77,9 | 59,5 | 77,9 |
| | Utena | 08.20–08.20 | 1 | 71,1 | 71,1 | 71,1 |
| | Varėna | 08.04–08.08 | 5 | 72,0 | 66,6 | 70,7 |
| 1962 | Kaunas | 05.22–06.15 | 25 | 85,9 | 77,6 | 85,9 |
| | Raseiniai | 09.22–10.03 | 12 | 82,7 | 76,5 | 82,7 |
| | Utena | 05.28–06.14 | 18 | 69,7 | 50,7 | 69,7 |
| 1967 | Dotnuva | 06.11–06.22 | 12 | 86,0 | 71,0 | 84,9 |
| 1968 | Dotnuva | 05.30–06.29 | 31 | 86,0 | 66,9 | 86,0 |
| 1974 | Dotnuva | 10.27–10.31 | 5 | 86,0 | 82,3 | 77,4 |
| 1977 | Dotnuva | 05.20–05.23 | 4 | 76,2 | 72,9 | 76,2 |
| 1978 | Utena | 10.21–10.30 | 10 | 65,0 | 59,0 | 65,0 |
| 1980 | Dotnuva | 09.06–09.06 | 1 | 74,1 | 74,1 | 74,1 |
| 1983 | Dotnuva | 05.01–05.15 | 15 | 81,4 | 69,8 | 71,8 |
| | Raseiniai | 05.01–06.09 | 40 | 84,8 | 76,1 | 80,5 |
| 1986 | Kaunas | 10.10–10.14 | 5 | 75,3 | 74,3 | 75,3 |
| 1993 | Kaunas | 09.01–09.09 | 9 | 81,4 | 76,6 | 74,5 |
| 1994 | Kaunas | 05.01–05.10 | 10 | 76,5 | 70,3 | 76,5 |
| | Lazdijai | 05.01–06.01 | 32 | 63,6 | 53,5 | 60,8 |
| 1995 | Raseiniai | 06.04–06.28 | 25 | 85,6 | 76,6 | 81,8 |
| 2000 | Utena | 07.25–09.14 | 52 | 74,3 | 50,8 | 74,3 |
| 2005 | Utena | 05.29–06.22 | 25 | 70,7 | 51,0 | 52,0 |
| | Varėna | 06.08–06.15 | 8 | 67,9 | 52,5 | 51,5 |
| 2006 | Kaunas | 10.04–10.10 | 7 | 82,1 | 77,3 | 82,1 |
| | Lazdijai | 10.10–10.10 | 1 | 51,6 | 51,6 | 51,6 |
| | Varėna | 09.20–10.12 | 23 | 65,8 | 49,1 | 55,9 |
| 2007 | Raseiniai | 07.07–07.10 | 4 | 86,0 | 83,2 | 86,0 |
| 2010 | Kaunas | 06.21–06.26 | 6 | 85,5 | 78,6 | 82,0 |
| | Lazdijai | 05.18–06.27 | 41 | 67,9 | 51,5 | 67,2 |
| | | 09.01–09.15 | 15 | 66,4 | 55,5 | 58,7 |
| 2013 | Lazdijai | 09.23–09.28 | 6 | 63,4 | 61,4 | 62,3 |
| 2017 | Dotnuva | 09.21–10.31 | 41 | 85,5 | 79,6 | 85,5 |
| 2020 | Dotnuva | 06.30–07.10 | 11 | 86,0 | 79,2 | 86,0 |
| | Lazdijai | 06.30–07.07 | 8 | 82,4 | 54,0 | 82,4 |

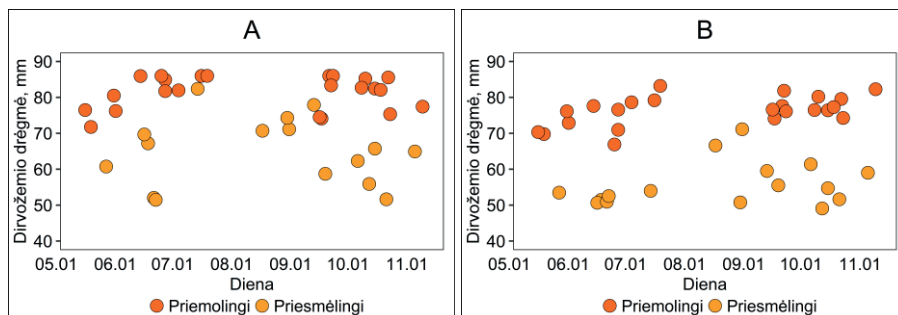
3.13 lentelė. Pirmos ilgo lietingo laikotarpio dienos, maksimalios viso reiškinio metu ir viso laikotarpio 0–20 cm dirvožemio sluoksnio drėgmės mediana (mm) 1951–2020 metais.

| Dirvožemiai | Stotis | Pirmą dieną | Maksimali | Visą laikotarpį |
|--------------|-----------------------------|-------------|-----------|-----------------|
| Priemolingi | Dotnuva | 81,2 | 85,7 | 75,1 |
| | Kaunas | 82,1 | 82,5 | 76,6 |
| | Raseiniai | 83,0 | 85,2 | 77,6 |
| | Pagal trijų stočių duomenis | 82,5 | 85,5 | 76,7 |
| Priesmėlingi | Lazdijai | 62,3 | 66,4 | 54,9 |
| | Utena | 69,7 | 70,7 | 51,8 |
| | Varėna | 60,8 | 66,9 | 53,8 |
| | Pagal trijų stočių duomenis | 65,3 | 67,9 | 53,9 |



3.32 pav. 0–20 cm dirvožemio sluoksnio drėgmė pirmą ilgo lietingo laikotarpio dieną ir maksimali drėgmė priemolinguose (A) bei priesmėlinguose (B) dirvožemiuose 1951–2020 metais.

Sausrų pagal TPI30 atvejais, dirvožemio drėgmė pasižymi sezoniškumu, kurių metu sezono pradžioje ir pabaigoje drėgmė yra didesnė nei sezono viduryje net ir sausros metu. Ilgų lietingų laikotarpių atveju tokių sezoninių skirtumų nėra (3.32 pav.), bet fiksuojama didelė dirvožemio drėgmės reikšmių sklaida nepriklausomai nuo sezono. Lyginant priemolinguos ir priesmėlingus dirvožemius nustatyta, kad priesmėlinguose dirvožemiuose drėgmės reikšmių sklaida didesnė nei priemolinguose (pirmos ilgo lietingo laikotarpio dienos drėgmės standartinis kvadratinis nuokrypis priemolingu dirvožemių siekia 4,5; priesmėlingų – 9,1). Drėgni periodai dirvožemyje išskirti, kai 10-ies dienų dirvožemio drėgmės slenkantis vidurkis pasiekia ir viršija 90-to ir 95-to procentilio ribą. Kreivės nuglotnintos pagal antro laipsnio polinomines funkcijas, kurios determinacijos koeficientas R^2 atskirose stotyse kinta nuo 0,60 iki 0,75 (3.26 pav.).



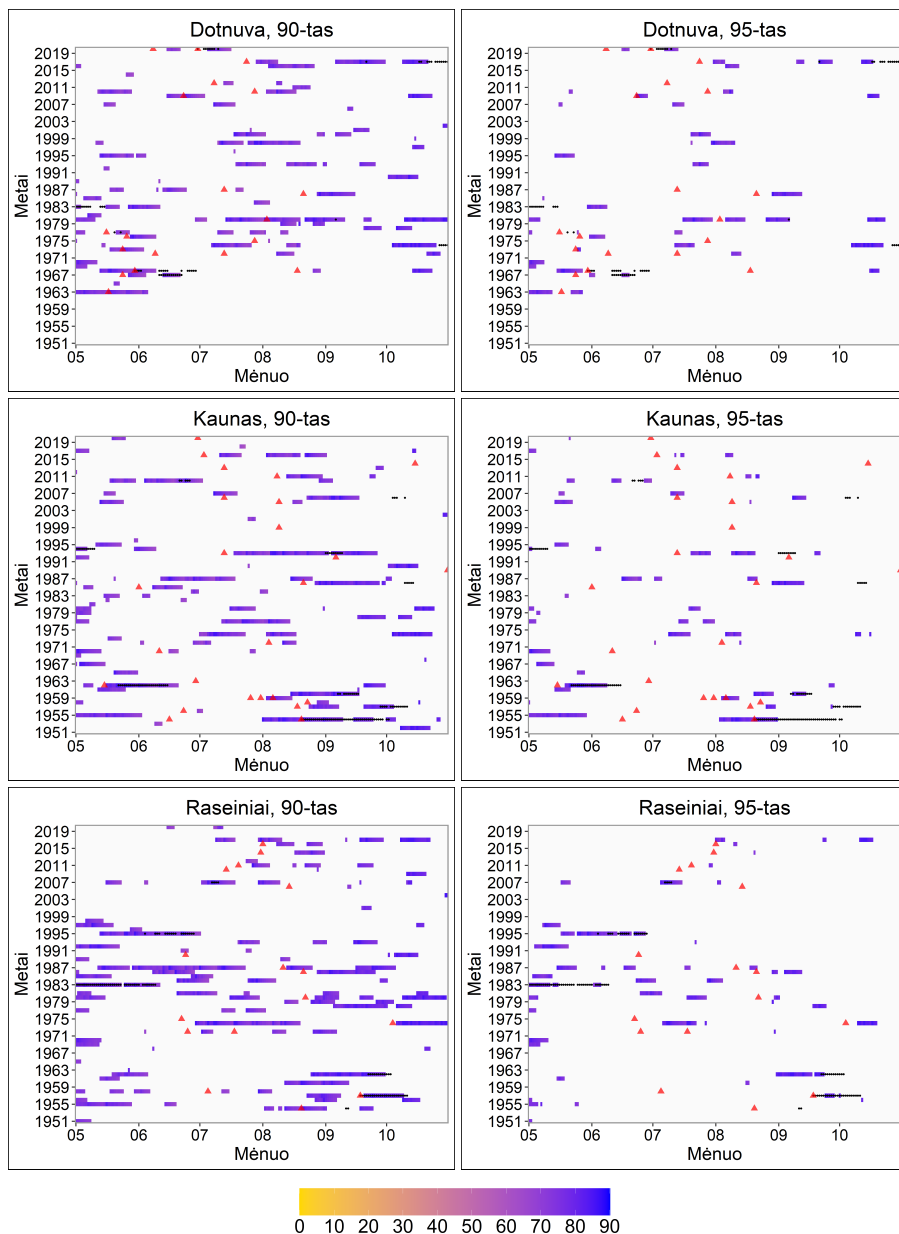
3.33 pav. 0–20 cm dirvožemio sluoksnio drėgmė pirmą ilgo lietingo laikotarpio dieną (A) ir viso ilgo lietingo laikotarpio reikšmių mediana (B) 1951–2020 metais. X ašyje pateikta data – vidurinė kiekvieno išskirto laikotarpio diena.

Drėgni periodai dirvožemyje. Drėgni periodai dirvožemyje (3.34 pav., 3.35 pav.) buvo išskirti, kai 10 dienų dirvožemio drėgmės slenkantis vidurkis pasiekia ar viršija 90-to ir 95-to procentilio ribas (3.26 pav.).

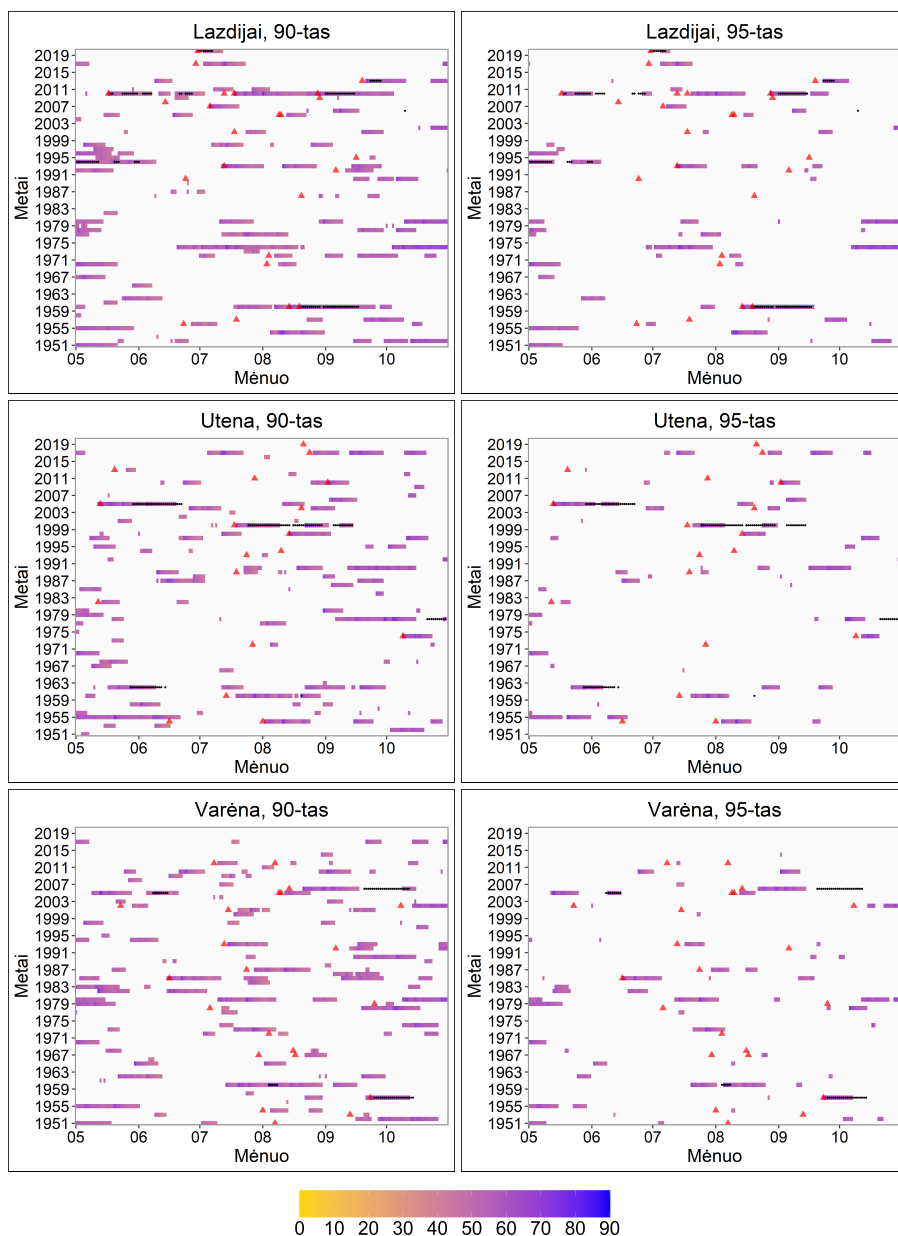
Drėgnas periodas dirvožemyje pagal 90-tą procentilį atskirose stotyse fiksuotas 6–8 metus per 10 metų, o pagal 95-tą – 4–5 metus. Tačiau per 10 metų tebuvo vos apie 1 metus su ilgu lietingu laikotarpiu, todėl dirvožemyje drėgnas periodas nustatytas daug dažniau (3.14 lentelė).

3.14 lentelė. Drėgnų periodų dirvožemyje ir ilgų lietingų laikotarpių skaičius per dešimtmetį, metų skaičius su reiškiniais per dešimtmetį, metų su keliais reiškiniais skaičius per dešimtmetį bei reiškinio trukmės mediana (dienomis) 1951–2020 metais.

| Stotis | Dotnuva | | Kaunas | | Raseiniai | | Lazdijai | | Utena | | Varėna | |
|---|---------|-----|--------|-----|-----------|-----|----------|-----|-------|-----|--------|-----|
| | 90 | 95 | 90 | 95 | 90 | 95 | 90 | 95 | 90 | 95 | 90 | 95 |
| Drėgnų periodų dirvožemyje skaičius | 15,0 | 7,2 | 13,0 | 7,4 | 15,1 | 7,7 | 14,9 | 8,0 | 15,9 | 7,6 | 17,1 | 8,6 |
| Metų skaičius su drėgnais periodais dirvožemyje | 7,4 | 4,1 | 7,0 | 4,3 | 6,7 | 4,3 | 6,4 | 4,6 | 7,3 | 4,6 | 7,6 | 4,9 |
| Metų skaičius su keliais drėgnais periodais dirvožemyje | 4,3 | 2,1 | 3,9 | 2,1 | 4,1 | 1,9 | 4,0 | 2,3 | 4,3 | 1,9 | 5,4 | 2,6 |
| Drėgno periodo dirvožemyje trukmės mediana | 8,0 | 6,0 | 7,0 | 4,0 | 8,5 | 5,0 | 9,0 | 7,5 | 6,0 | 7,0 | 7,0 | 5,5 |
| Ilgų lietingų laikotarpių skaičius | 1,4 | | 1,0 | | 0,7 | | 1,2 | | 0,7 | | 0,6 | |
| Metų skaičius su ilgų lietingų laikotarpiu | 1,4 | | 1,0 | | 0,7 | | 0,9 | | 0,7 | | 0,6 | |
| Metų skaičius su keliais ilgais lietingais laikotarpiais | 0,0 | | 0,0 | | 0,0 | | 0,3 | | 0,0 | | 0,0 | |
| Ilgų lietingo laikotarpio trukmės mediana | 11,5 | | 10,0 | | 18,0 | | 15,0 | | 18,0 | | 14,0 | |



3.34 pav. 0–20 cm dirvožemio sluoksnio drėgmė drėgnų periodų dirvožemyje metu (spalvota skalė, mm). Drėgni periodai išskirti pagal 90-to (kairėje) ir 95-to (dešinėje) dirvožemio drėgmės reikšmių skirstinio procentilio ribas priemolinguose dirvožemiuose 1951–2020 metais. Juodais taškais pažymėti ilgi lietingi laikotarpiai, kurie paveiksle nėra sujungti. Raudoni trikampiai – kritulių kiekis ≥ 40 mm per parą.



3.35 pav. 0–20 cm dirvožemio sluoksniu drėgmė drėgnų periodų dirvožemyje metu (spalvota skalė, mm). Drėgni periodai išskirti pagal 90-to (kairėje) ir 95-to (dešinėje) dirvožemio drėgmės reikšmių skirstinio procentilio ribas priesmėlinguose dirvožemiuose 1951–2020 metais. Juodais taškais pažymėti ilgi lietingi laikotarpiai, kurie paveiksle nėra sujungti. Raudoni trikampiai – kritulių kiekis ≥ 40 mm per parą.

Pagal 90-tą procentilį išskirtų drėgnų periodų trukmės mediana yra apie 1–4 dienas didesnė nei pagal 95-tą (išskyrus Uteną) (3.14 lentelė), o ilgo lietingo laikotarpio trukmės mediana stotyse yra 3–13 dienų ilgesnė nei drėgnų periodų dirvožemyje (priklausomai nuo naudoto procentilio drėgniems periodams dirvožemyje išskirti).

Vertinant, kaip drėgni periodai dirvožemyje identifiko ilgus lietingus laikotarpius, nustatyta, kad absoliuti dauguma ilgų lietingų laikotarpių buvo identifikuoti. Pagal 90-tą procentilį identifikuota vienu daugiau nei pagal 95-tą. Pagal 90-tą neidentifikuoti tik 4 ilgi lietingi laikotarpiai – Kaune, Raseiniuose ir Lazdijuose.

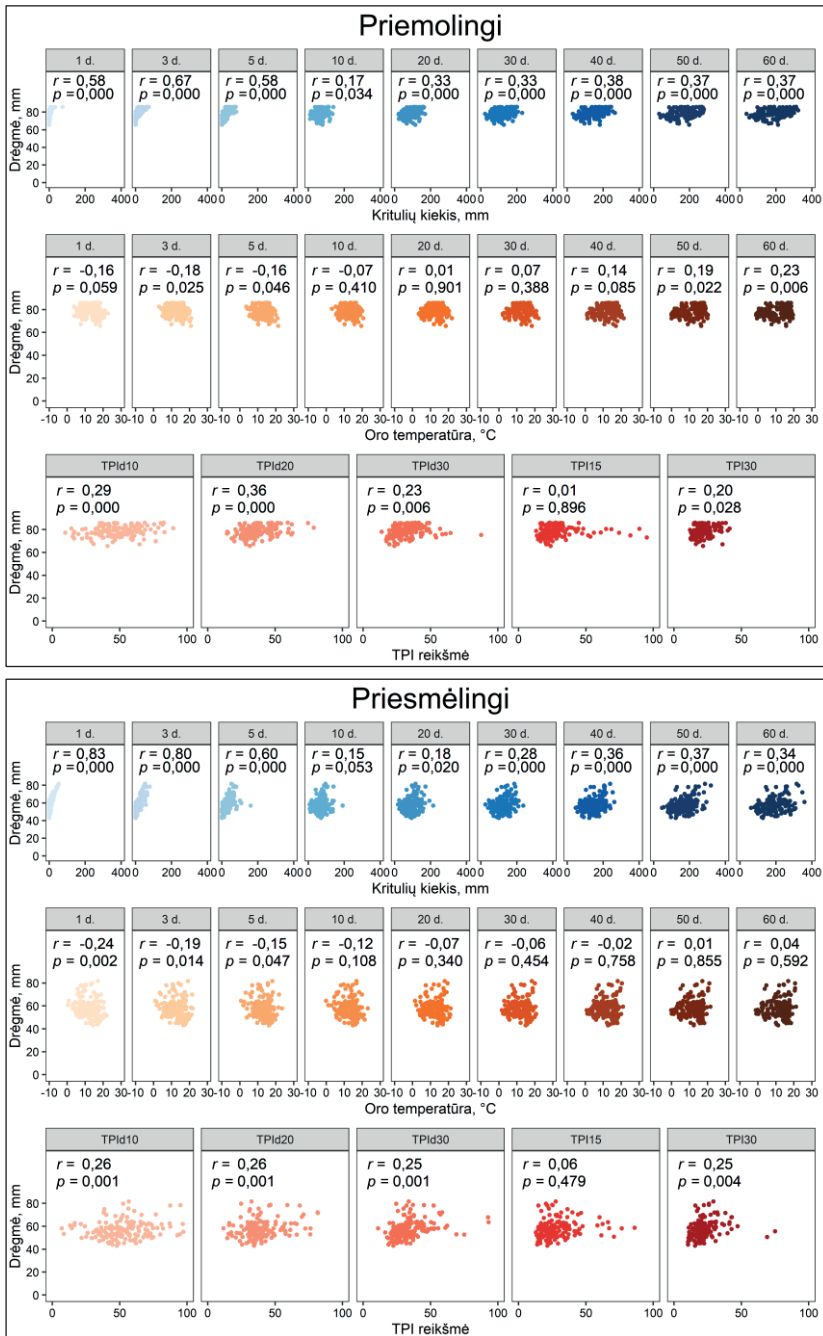
Pagal 95-tą procentilį iš viso neidentifikuoti 5 lietingi laikotarpiai – 3 stotyse po vieną neidentifikuotą atvejį, o Kaune – 2 (3.15 lentelė). Dauguma neidentifikuotų lietingų laikotarpių prasilenkia laiko skalėje su drėgnais periodais dirvožemyje ir yra nustatomi vėliau, nei baigiasi drėgnas periodas.

3.15 lentelė. Identifikuotų (+) ir neidentifikuotų (-) ilgų lietingų laikotarpių skaičius naudojant dirvožemio drėgmės pagal 90-tą ir 95-tą procentilius reikšmes 1951–2020 metais. Prie meteorologijos stoties pavadinimo pateiktas ilgų lietingų laikotarpių skaičius.

| Drėgmės procentilis | Ident.+ neident.- | Dotnuva (8) | Kaunas (9) | Raseiniai (6) | Lazdijai (7) | Utena (5) | Varėna (4) | Iš viso (39) |
|---------------------|-------------------|-------------|------------|---------------|--------------|-----------|------------|--------------|
| 90-tas procentilis | + | 8 | 7 | 5 | 6 | 5 | 4 | 35 |
| | - | 0 | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 4 |
| 95-tas procentilis | + | 7 | 7 | 5 | 6 | 5 | 4 | 34 |
| | - | 1 | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 5 |

Vertinant drėgno periodo ir lietingo laikotarpio pradžią pastebima, kad visada drėgnas periodas dirvožemyje identifikuotas anksčiau nei ilgas lietingas laikotarpis (3.34 pav., 3.35 pav.). Pagal 90-tą procentilį identifikuojamas didesnis ilgų lietingų laikotarpių skaičius (3.14 lentelė), kurių nemažą dalį sudaro trunkantys vos kelias dienas.

Pirmą drėgno periodo dirvožemyje dieną tiek pagal 90-tą, tiek pagal 95-tą procentilį dirvožemio drėgmė stipriausia, teigiamą ir statistiškai reikšmingą ($p < 0,05$) ryšį turi su prieš tai buvusiu 1–5 dienų kritulių kiekiu ($r = 0,51–0,85$) (3.36 pav., 7 priedas, 8 priedas). Tai gali reikšti, kad dirvožemio drėgmė išauga dėl paskutinių kelių dienų kritulių ir pasiekia drėgno periodo dirvožemyje kriterijaus ribą. Be to, abu reiškiniai gali prasidėti ir po ypač gausių paros kritulių (3.34 pav., 3.35 pav.).



3.36 pav. Ryšys tarp 0–20 cm dirvožemio sluoksnio drėgmės pirmą drėgno periodo dirvožemyje dieną pagal 95-tą procentilį ir prieš tai buvusio kritulių kiekio, vidutinės oro temperatūros už 1–60 dienų laikotarpį bei kasdienių TPI indekso (TPI_{d10}, TPI_{d20}, TPI_{d30}, TPI₁₅, TPI₃₀) reikšmių 1951–2020 metų gegužės–spalio mėnesiais priemolinguose ir priesmėlinguose dirvožemiuose.

Ryšys tarp dirvožemio drėgmės pirmą drėgno periodo dieną ir įvairių laikotarpių vidutinės oro temperatūros, TPI_{d30} , TPI_{15} ir TPI_{30} silpnas ir daugiausia nereikšmingas, o tarp TPI_{d10} ir TPI_{d20} , nors ir daugelyje stočių reikšmingas, tačiau vis tiek silpnas. Todėl drėgniems periodas susidaryti dirvožemyje yra svarbiausias iki 5 dienų buvęs kritulių kiekis, ir būtent per šį periodą iškritęs kritulių kiekis nulemia drėgno periodo dirvožemyje pradžią.

Dėl to galima kelti klausimą, ar ilgo lietingo laikotarpio kriterijus, apimantis paskutinių 60 dienų kritulių kiekį ir lyginantis jį su daugiamečiais reikšmėmis, nėra per ilgas. Kita vertus, Stichinių ir katastrofinių reiškinių kriterijuose yra nustatytas *ilgai trunkantis labai smarkus lietus*, kada per 5 paras ar trumpiau iškrinta bent 2 kartus daugiamečę klimato normą viršijantis kritulių kiekis (Lietuvos Respublikos..., 2020). Apskaičiavus tokį analizuojamų stočių rodiklį nustatyta, kad per 1951–2020 metų laikotarpį tik Varėnoje 2005 metais rugpjūtį ir Lazdijuose 2013 metais rugsėjį šis kriterijus buvo pasiektas. Toks pasikartojimas yra labai retas ir, tikriausiai, šis kriterijus taip pat nėra tinkamas perteklinėms drėgnumo sąlygoms identifikuoti.

3.6. Žemės ūkio augalų derlingumas ekstremalių drėgmės sąlygų metu

Šiame poskyryje pateiktas žemės ūkio augalų – javų (vasarinių ir žieminių javų) bei šakniavaisių (cukriniai runkeliai ir bulvės) metinio derlingumo statistikos vertinimas 2000–2020 metais savivaldybėse, kuriose yra šešios analizuojamos meteorologijos stotys. Cukrinių runkelių derlingumas vertinamas tik trijose stotyse dėl mažesnio pradinių duomenų skaičiaus. Derlingumas analizuojamas ieškant sąsajų tarp pagal SWAP modelio išvesties dirvožemio drėgmę išskirtų sausų ir drėgnų periodų dirvožemyje bei derlingumo anomalijų, siekiant nustatyti galimą šių reiškinių poveikį žemės ūkio augalų derlingumui. Sausi ir drėgni periodai dirvožemyje išskirti atitinkamai pagal 5-tą ir 95-tą drėgmės procentilius.

Vidutinis vasarinių javų derlingumas analizuojamose savivaldybėse, pagal 2000–2020 metų duomenis, kinta nuo 1,52 t/ha Varėnos rajono savivaldybėje iki 3,68 t/ha Kėdainių rajono savivaldybėje. Visos Lietuvos vidurkis siekia 2,83 t/ha (3.16 lentelė). Žieminiai javai pasižymi didesniu derlingumu nei vasariniai – nuo 1,92 Varėnos rajono savivaldybėje iki 4,57 t/ha Kėdainių rajono savivaldybėje (Lietuvos vidurkis 3,88 t/ha).

Vidutinis bulvių derlingumas didžiausias Kėdainių rajono savivaldybėje (22,5 t/ha), o mažiausias – Varėnoje (10,9 t/ha). Cukrinių runkelių derlingumas buvo apie 48–50 t/ha (3.16 lentelė).

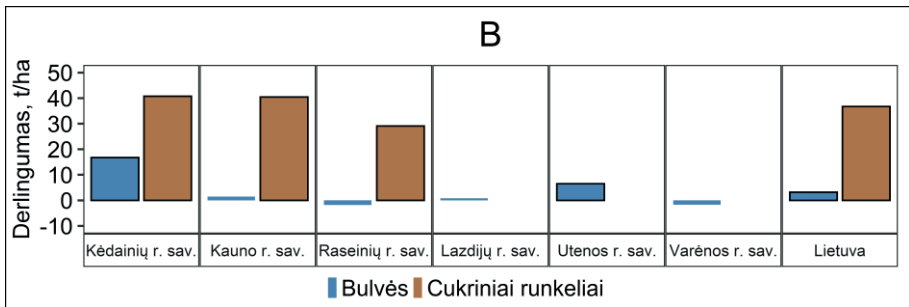
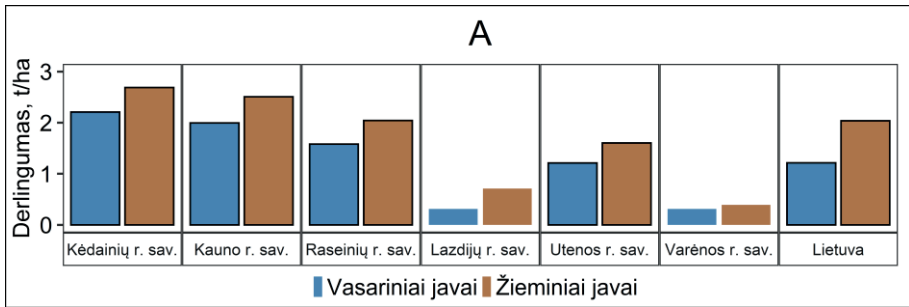
3.16 lentelė. Vidutinis, minimalus ir maksimalus žieminių (Ž.), vasarinių (V.) javų ir cukrinių runkelių (C.) bei bulvių (B.) derlingumas (t/ha) savivaldybėse 2000–2020 metais. Brūkšnelis rodo, kad duomenų nėra.

| Savivald. | Stotis | Javai | | | | Šakniavaisiai | | | |
|-----------|-----------|-------|------|------|-------|---------------|------|------|-------|
| | | Tipas | Vid. | Min. | Maks. | Tipas | Vid. | Min. | Maks. |
| Kėdainių | Dotnuva | Ž. | 4,6 | 2,5 | 6,4 | C. | 48,7 | 32,0 | 70,7 |
| | | V. | 3,7 | 2,0 | 5,2 | B. | 22,5 | 12,7 | 32,6 |
| Kauno | Kaunas | Ž. | 4,3 | 2,8 | 5,8 | C. | 50,4 | 30,1 | 85,3 |
| | | V. | 3,4 | 2,1 | 4,6 | B. | 15,0 | 5,3 | 26,3 |
| Raseinių | Raseiniai | Ž. | 3,8 | 2,5 | 5,4 | C. | 46,8 | 27,9 | 84,6 |
| | | V. | 3,0 | 1,8 | 4,2 | B. | 14,2 | 6,2 | 20,0 |
| Lazdijų | Lazdijai | Ž. | 2,5 | 1,7 | 3,5 | C. | - | - | - |
| | | V. | 2,2 | 1,5 | 3,2 | B. | 13,0 | 2,2 | 18,0 |
| Utenos | Utena | Ž. | 2,4 | 1,1 | 4,1 | C. | - | - | - |
| | | V. | 2,0 | 1,0 | 3,0 | B. | 11,8 | 3,0 | 22,1 |
| Varėnos | Varėna | Ž. | 1,9 | 1,2 | 2,6 | C. | - | - | - |
| | | V. | 1,5 | 0,7 | 2,2 | B. | 10,9 | 4,9 | 16,6 |
| Lietuva | – | Ž. | 3,9 | 2,3 | 5,3 | C. | 48,2 | 31,9 | 71,0 |
| | | V. | 2,8 | 1,7 | 3,8 | B. | 14,4 | 7,9 | 18,1 |

Per visą analizuojamą laikotarpį javų derlingumas labai stipriai išaugo (3.37A pav.). Dauguma pokyčių yra statistiškai reikšmingi ($p < 0,05$), o nereikšmingi pokyčiai yra tik Lazdijų ir Varėnos rajono savivaldybėse. Tiek vasarinių (2,2 t/ha), tiek žieminių javų (2,7 t/ha) derlingumas daugiausia išaugo Kėdainių rajono savivaldybėje, kurioje derlingumas ir yra vidutiniškai didžiausias iš visų tirtų savivaldybių (3.16 lentelė). Taip pat žieminių javų derlingumas visose savivaldybėse išaugo daugiau nei vasarinių.

Šie pokyčiai daugiausia susiję su sparčia augalininkystės technologijų kaita, didėjančiomis investicijomis į žemės ūkį, geresnėmis klimatinėmis sąlygomis (Lietuvos agrarinės..., 2015), produktyvesne sėkla ir kt. Derlingumas auga ir dėl genetinių augalų tobulinimo bei žemės ūkio darbų praktikos (Peltonen-Sainio ir kt., 2009).

Cukrinių runkelių derlingumas taip pat statistiškai reikšmingai išaugo, tačiau bulvių derlingumo pokyčiai yra mažesni nei cukrinių runkelių ir statistiškai reikšmingi tik dviejose savivaldybėse (3.37A pav.).



3.37 pav. Vasarinių ir žieminių javų (A) ir bulvių bei cukrinių runkelių (B) derlingumo rajonų savivaldybėse pokyčiai (t/ha) 2000–2020 metais. Pokyčiai apskaičiuoti pagal Seno regresijos kreivę. Statistiškai reikšmingi pokyčiai ($p < 0,05$) paryškinti apvadu.

Norint įvertinti, kiek derlingumo dinamiką lemia dirvožemio drėgmės ekstremumai (sausis ir drėgni periodai dirvožemyje), prieš išskiriant anomalaus derlingumo metus, duomenų sekose esantys trendai (3.37 pav.) buvo pašalinti iš kiekvienų metų reikšmės atimant prognozuojamą reikšmę pagal tiesinio trendo lygtį. 3.17 lentelėje pateiktos standartizuotos derlingumo duomenų reikšmės pašalinus trendą: jos rodo, kiek atskirų metų derlingumas yra anomalus, palyginti su viso laikotarpio derlingumu toje savivaldybėje.

Siekiant įvertinti ekstremalių meteorologinių sąlygų poveikį žemės ūkio augalų (žieminių ir vasarinių javų (3.17 lentelė) ir bulvių bei cukrinių runkelių (9 priedas) derlingumui, analizuojami metai, kurie pasižymėjo mažesniu (standartizuota derlingumo reikšmė ≤ -1) ir didesniu (≥ 1) derlingumu nei įprastai.

3.17 lentelė. Standartizuotos žieminių (Ž.) ir vasarinių (V.) javų derlingumo reikšmės skirtingose rajono savivaldybėse. Raudonai pažymėtos neigiamos anomalijos (≤ -1), žaliai – teigiamos anomalijos ($\geq +1$) reikšmės.

| Sav. / Tipas | Lietuvos Respublika | | Kėdainių r. sav. | | Kauno r. sav. | | Raseinių r. sav. | | Lazdijų r. sav. | | Utenos r. sav. | | Varėnos r. sav. | |
|-----------------|------------------------|------|---------------------|------|------------------|------|---------------------|------|--------------------|------|-------------------|------|--------------------|------|
| | Ž. | V. | Ž. | V. | Ž. | V. | Ž. | V. | Ž. | V. | Ž. | V. | Ž. | V. |
| 2000 | 0,4 | 0,2 | 0,1 | -0,1 | -0,3 | -0,7 | 1,0 | 0,5 | -0,8 | -0,7 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | -0,2 |
| 2001 | -0,3 | -0,3 | -0,7 | -0,6 | -0,9 | -1,0 | 0,6 | 0,2 | -0,1 | -0,2 | -0,2 | 0,0 | 0,1 | 0,4 |
| 2002 | 0,6 | -0,3 | 0,4 | -0,6 | 1,2 | 0,5 | 0,9 | 0,0 | 0,2 | 0,3 | 0,7 | -0,3 | 1,1 | 0,6 |
| 2003 | 0,2 | 1,0 | 0,0 | 1,0 | -0,2 | 0,9 | -0,2 | 0,9 | 1,1 | 1,5 | 0,1 | 0,4 | 1,0 | 0,9 |
| 2004 | 0,9 | 0,7 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 1,0 | 0,6 | 0,9 | 0,5 | 0,6 | 0,5 | 0,5 | 0,0 |
| 2005 | 0,1 | -0,1 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,5 | -0,2 | 0,3 | 0,0 | -0,1 | -0,4 | -0,5 | -1,4 | -1,0 |
| 2006 | -2,3 | -2,3 | -2,1 | -2,2 | -1,6 | -0,8 | -1,5 | -2,1 | -1,7 | -1,5 | -1,6 | -2,0 | -1,9 | -2,3 |
| 2007 | 0,1 | -0,4 | 0,3 | -0,1 | -0,1 | -0,9 | -0,4 | -1,4 | 0,3 | -0,1 | 0,0 | 0,4 | -0,5 | -0,2 |
| 2008 | 0,8 | -0,1 | 0,9 | 0,0 | 1,0 | 0,4 | -0,7 | -1,0 | 0,3 | -0,4 | 0,0 | 0,3 | 1,2 | 1,2 |
| 2009 | 0,2 | 0,2 | 0,7 | 0,4 | 0,4 | 0,3 | -0,3 | -0,2 | -0,1 | 0,1 | 0,9 | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| 2010 | -1,5 | -1,0 | -1,6 | -0,8 | -2,2 | -1,3 | -2,1 | -0,7 | -1,0 | -1,6 | -1,6 | -1,4 | -1,5 | -1,1 |
| 2011 | -1,8 | 0,4 | -1,3 | 0,2 | -1,3 | -0,7 | -1,6 | -0,1 | -0,2 | -0,2 | -1,3 | -0,1 | -1,1 | -0,3 |
| 2012 | 1,2 | 0,9 | 1,3 | 1,1 | 0,9 | 0,8 | 1,2 | 1,0 | 1,2 | 1,6 | 0,6 | 0,9 | 1,3 | 0,4 |
| 2013 | -0,2 | 0,6 | 0,1 | 0,2 | 0,4 | 1,5 | -0,3 | 1,3 | 0,2 | 0,6 | 0,1 | 0,5 | -0,7 | 0,5 |
| 2014 | 0,1 | 1,9 | 0,9 | 1,8 | 1,2 | 2,0 | 0,1 | 1,0 | 1,5 | 2,3 | 1,0 | 1,7 | 0,2 | 0,6 |
| 2015 | 1,8 | 1,6 | 1,5 | 1,7 | 1,1 | 1,2 | 1,8 | 2,1 | 1,0 | -0,5 | 2,1 | 1,6 | 1,0 | 0,7 |
| 2016 | 0,0 | -0,3 | 0,2 | -0,5 | 0,2 | -0,7 | 0,1 | -1,2 | -2,4 | -0,7 | 1,6 | 1,1 | 0,1 | 0,3 |
| 2017 | 0,7 | -0,2 | 0,1 | -0,5 | 0,5 | -1,3 | 0,7 | -0,2 | -0,4 | 0,0 | -1,3 | -1,4 | 0,4 | 1,8 |
| 2018 | -1,1 | -2,0 | -1,2 | -1,6 | -1,5 | -1,6 | -1,1 | -1,1 | -0,7 | -0,9 | -1,2 | -1,8 | -0,5 | -1,6 |
| 2019 | -0,9 | -0,9 | -1,6 | -1,3 | -1,0 | -0,5 | 0,1 | -0,5 | -0,7 | -1,3 | -0,7 | -0,8 | -1,3 | -1,8 |
| 2020 | 0,8 | 0,6 | 0,9 | 0,6 | 0,6 | 0,7 | 1,1 | 0,5 | 1,6 | 1,1 | 0,4 | 0,4 | 1,5 | 0,7 |

Metai, kai derlingumas buvo anomaliai mažas. Analizuojant tiek vasarinių, tiek žieminių javų standartizuotas derlingumo reikšmes, buvo galima pakankamai aiškiai išskirti metus, kai daugumoje savivaldybių vyravo neigiamo ar teigiamo ženklo anomalijos abiem javų tipams. Daugumoje analizuojamų savivaldybių išskiriami šešeri metai (2006, 2010, 2011, 2017, 2018 ir 2019 metai), kuriais fiksuotos standartizuotos javų derlingumo reikšmės mažesnės nei -1 (stipri neigiama anomalija). Analizuojant šiuos metus įvertinamas sausų (pagal 5-tą procentilį) bei drėgnų (pagal 95-tą procentilį) periodų dirvožemyje pasikartojimas (10 priedas). Vertinami tik tie reiškiniai, kurie prasidėjo ne vėliau nei rugsėjo 1 dieną, kadangi rugpjūčio mėnesio pabaigoje dažniausiai jau yra nuimtas javų derlius.

Išskirti šešeri metai (2001, 2006, 2010, 2015, 2017, 2018 metai), kada vyravo mažesnis cukrinių runkelių ir (ar) bulvių derlingumas didesnėje savivaldybių dalyje. Sąlygos, vyravusios tais metais, analizuojamos iki spalio pabaigos, nes šakniavaisių derlius nuimamas vėliau.

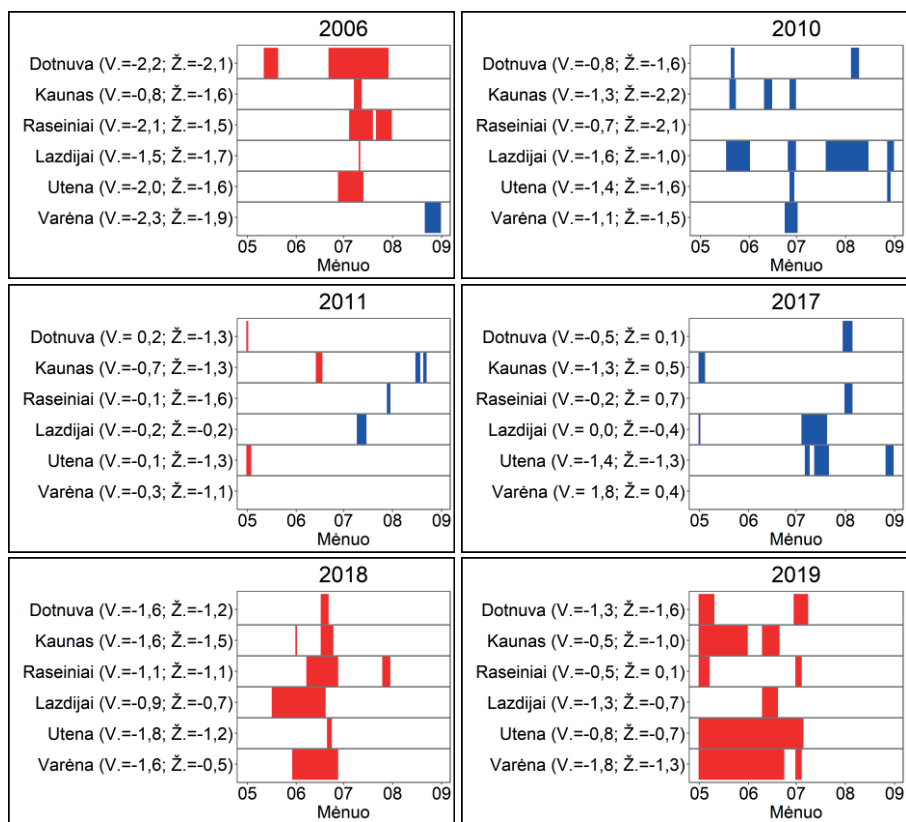
2001 metais stiprios neigiamos bulvių derlingumo anomalijos buvo fiksuotos beveik visose rajonų savivaldybėse, o cukrinių runkelių – nė vienoje. Tais metais drėgnas periodas dirvožemyje buvo fiksuotas vos po kelias dienas Lazdijuose (sezono viduryje ir pabaigoje) ir Utenoje sezono pradžioje, todėl šių metų bulvių derlingumo anomalijas susieti su drėgmės stygiaus ar pertekliaus sąlygomis galimybės nėra (11 priedas).

2006 metais visose savivaldybėse buvo mažesnis derlingumas nei įprastai tiek vasarinių, tiek žieminių javų, o bendrai derlingumas visoje Lietuvoje pasižymėjo pačia didžiausia neigiama anomalija (-2,3) (3.17 lentelė). Šiais metais daugumoje stočių buvo fiksuotas tiek sausas periodas dirvožemyje sezono viduryje, tiek drėgnas periodas rugsėjo mėnesį. 2006 metais taip pat fiksuotos stiprios bulvių derlingumo neigiamos anomalijos, kurias papildomai galėjo lemti ir drėgnas periodas rugsėjo mėnesį.

Šiais metais buvo sausas periodas dirvožemyje (pagal 5-tą procentilį): Utenoje, Lazdijuose, Kaune, Dotnuvoje bei Raseiniuose, o jis nefiksuotas tik Varėnoje (3.38 pav.). Ilgiausiai sausas periodas truko Dotnuvoje, kurioje buvo nustatytas didžiausias derlingumo nuokrypis pagal standartizuotą reikšmę. Drėgnas periodas pagal 95-tą procentilį nustatytas tik analizuojamo sezono pabaigoje Varėnoje. Kadangi beveik visose stotyse fiksuotas sausas periodas dirvožemyje, tai 2006 metais žieminių ir vasarinių javų derlingumo sumažėjimas gali būti siejamas su sausomis sąlygomis. 2006 metų Lietuvos žemės ir maisto ūkio apžvalgoje teigiama, kad žemės ūkio nuostoliai (sunaikinti augalai arba prastesnė derliaus kokybė) buvo patirti dėl vėlyvo bei šalto pavasario, pirmoje vasaros pusėje buvusios sausros ir liūčių javų apjūtės metu (Lietuvos agrarinės..., 2007).

2010 metais vasarinių ir žieminių javų derlingumas visose savivaldybėse ir bendrai Lietuvoje buvo mažesnis nei įprastai. Sausas periodas pagal 5-tą procentilį nėra fiksuotas nė vienoje stotyje, tačiau visose stotyse (išskyrus Raseinius) išskirtas drėgnas periodas pagal 95-tą procentilį (3.38 pav.). Būtent perteklinis drėgnumas vasaros viduryje ir antroje sezono pusėje galėjo nulemti mažesnę derlių.

2010 metais neigiama bulvių derlingumo anomalija buvo fiksuota tik Kauno ir Raseinių rajonų savivaldybėse, o kitose stotyse, pavyzdžiui, Lazdijuose, didelę sezono dalį vyravo drėgnos sąlygos, tačiau bulvių derlingumas buvo didesnis nei vidutinis.



3.38 pav. Sausi periodai dirvožemyje pagal 5-tą procentilį (raudonai) ir drėgni periodai dirvožemyje pagal 95 procentilį (mėlynai) stotyse metais, kai buvo fiksuojamos stiprios neigiamos vasarinių ir žieminių javų derlingumo reikšmių anomalijos. Šalia stoties pavadinimo pažymėta savivaldybės, kurioje yra stotis, standartizuota vasarinių (V.) ir žieminių (Ž.) javų derlingumo reikšmė.

Tai, kad sausros (nors dirvožemyje ir nefiksuotos) ir liūtys sumažino derlingumą, teigiama ir 2010 metų Lietuvos žemės ir maisto ūkio apžvalgoje, kuri papildyta informacija apie žiemkenčių iššalimus žiemą (Lietuvos agrarinės..., 2011). Tikriausiai dėl iššalimų žiemą žieminių javų derlingumas labiau sumažėjo nei vasarinių.

2011 metais kiek žymesnis derlingumo sumažėjimas fiksuotas tik žieminių javų. 2011 metais buvo fiksuoti neilgi sausi periodai pagal 5-tą procentilį Utenoje, Kaune ir Dotnuvoje, o drėgni periodai pagal 95-tą procentilį – Lazdijuose, Kaune ir Raseiniuose (3.38 pav.). Šie reiškiniai buvo trumpalaikiai, todėl didelės žalos nepadarė. Vis dėlto, stipria neigiama derlingumo anomalija išsiskiria žieminiai javai. 2010 metų gruodis ir 2011

metų vasaris buvo šaltesni, palyginti su daugiamečiu vidurkiu (gruodį 4,7–6,0 °C ir vasarį 4,2–3,5 °C žemiau 1951–2020 metų vidurkio). Vidutinė mėnesio sniego danga gruodį siekė 13–18 cm, o vasarį – 6–15 cm, todėl gali būti, kad ji buvo per plona apsaugoti žiemkenčius nuo iššalimo (minimali oro temperatūra gruodį buvo nukritus iki -17,6 – -23,3 °C, vasarį iki -20,9 – -26,1 °C). Apie nepalankias žiemojimo sąlygas, kurios nulėmė augalų iššalimą ir išmirkimą, teigiama ir 2011 metų Lietuvos žemės ir maisto ūkio apžvalgoje (Lietuvos agrarinės..., 2012).

2017 metais Utenos rajono savivaldybėje nustatytas mažesnis nei įprastai derlingumas tiek vasarinių, tiek žieminių javų, Kauno – tik vasarinių, o Varėnoje vasarinių javų ir visoje Lietuvoje žieminių javų derlingumas buvo didesnis nei įprastai. Dienų su sausu periodu dirvožemyje niekur nefiksuota (3.38 pav.). Drėgnas periodas išskirtas visose stotyse, išskyrus Varėną.

2017 metai buvo išskirtiniai tuo, kad sezono pradžioje kai kur buvo kritulių trūkumas (Rimkus ir kt., 2020), o antroje pusėje – išskirtinai didelis kritulių kiekis, kuris kenkė ne tik augalams – trukdė nuimti derlių ir paruošti žemę žieminių javų sėjai. Tačiau net ir esant tokioms sąlygoms bent jau grūdinių augalų derlius Lietuvoje 2017 metais buvo tik apie 3 % mažesnis nei 2016 (Lietuvos agrarinės..., 2018) ir kiek didesnis derlingumo sumažėjimas fiksuotas tik pavieniais atvejais (3.17 lentelė).

Šakniavaisių derlingumas labai sumažėjo (9 priedas). Teigiama, kad tokių augalų, kaip bulvės ir kitos lauko daržovės, buvo nuimta iki trečdaliao mažiau nei 2016 (Lietuvos agrarinės..., 2018). Kaip ir javai, taip ir bulvės, cukriniai runkeliai galėjo nukentėti nuo pernelyg drėgnų orų. Taip pat dėl lietingo rudens buvo trikdomas ne tik derliaus nuėmimas, bet ir žieminių augalų sėjos darbai. Šie metai buvo išskirtiniai ir tuo, kad atskirose Lietuvos vietovėse kelis mėnesius iš eilės buvo viršijamas kritulių kiekis, sukėlęs nuostolių žemės ūkiui.

2018 metais visose analizuojamose savivaldybėse tiek vasarinių, tiek žieminių javų derlingumas buvo mažesnis nei įprastai. Taip pat dalyje savivaldybių nustatytos ir neigiamos šakniavaisių derliaus anomalijos. Sausi periodai pagal 5-tą procentilį buvo visose šešiose meteorologijos stotyse (3.38 pav.). Drėgnas periodas dirvožemyje šiais metais nebuvo fiksuotas. Tai, kad net ketvirtadaliu sumažėjo javų derlius dėl sausros, teigiama 2018 metų Lietuvos žemės ir maisto ūkio apžvalgoje (Lietuvos agrarinės..., 2019; Lietuvos agrarinės..., 2020).

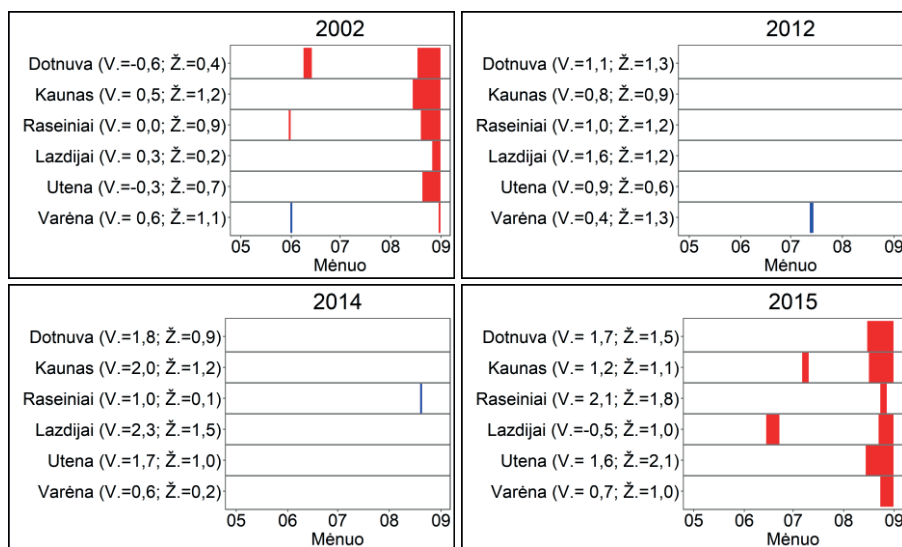
2019 metais derlingumas daugiausia sumažėjo Varėnos ir Kėdainių rajono savivaldybėse, tačiau ir kitose vyrauja neigiami nuokrypiai. Sausi periodai dirvožemyje pagal 5-tą procentilį fiksuoti visose stotyse (3.38 pav.).

2019 metais visose stotyse buvo fiksuotas sausas periodas dirvožemyje, tačiau jo trukmės ir derlingumo anomalijos dydį susieti sudėtinga. Pavyzdžiui,

Varėnoje buvo net 58 dienos su sausu periodu pagal 5-tą procentilį, o derlingumo anomalija buvo stipriai neigiama (žieminių javų -1,8; vasarinių -1,3 anomalija). Tačiau Utenoje sausas periodas truko net 66 dienas, o anomalija mažesnė nei Varėnoje (nesiekia -1). Pažymėtina, kad keturiose tiriamose vietovėse 2019 metais buvo fiksuojama daugiau sausų dienų nei 2018 metais. Tačiau neigiamas javų derlingumo nuokrypis 2018 buvo didesnis nei 2019 metais. Kita vertus, 2019 metais cukrinių runkelių derlius buvo didesnis nei įprastai ir tai galėjo nulėmti sezono pabaigoje išsivyravusios sausos, palankios derliui nuimti dirvožemio sąlygos (ypač Kaune ir Raseiniuose) (11 priedas).

Metai, kai derlingumas buvo didesnis nei įprastai. Per analizuojamą laikotarpį galima išskirti ir kelerius metus (2012, 2014, 2015), kai derlingumas didesnėje dalyje savivaldybių buvo didesnis nei įprastai.

2012 ir 2014 metais visose savivaldybėse tiek žieminių, tiek vasarinių javų derlingumas buvo didesnis nei įprastai (teigiama standartizuota derlingumo reikšmė). Taip pat 2012 metais bulvių, o 2014 metais bulvių ir cukrinių runkelių derlingumas buvo didesnis. Šiais metais sausų periodų dirvožemyje nebuvo fiksuota, o drėgnų – vos dvi dienos Varėnoje 2012 metais ir viena diena Raseiniuose 2014 metais (3.39 pav.). Nepalankių drėgmės sąlygų nebuvimas tais metais galėtų būti siejamas su didesniu derlingumu.



3.39 pav. Sausi periodai dirvožemyje pagal 5-tą procentilį (raudonai) ir drėgni periodai dirvožemyje pagal 95 procentilį (mėlynai) stotyse metais, kai fiksuotos teigiamos vasarinių ir žieminių javų derlingumo anomalijos. Šalia stoties pavadinimo pažymėta savivaldybės, kurioje yra stotis, standartizuota vasarinių (V.) ir žieminių (Ž.) javų derlingumo reikšmė.

2015 metai gali būti vertinami kaip didžiausio javų derlingumo metai per visą analizuojamą laikotarpį. Nors jais buvo fiksuotas sausas periodas visose stotyse, tačiau daugiausia drėgmės trūkumas buvo fiksuotas nuo rugpjūčio antros pusės, todėl vasariniams ir žieminiams javams tai jau nebeturėjo neigiamos reikšmės, o netgi atvirkščiai – buvo palankios sąlygos derliui nuimti. 2015 metais vertinami kaip vieni geriausių metų žemės ūkiui, nes buvo nedaug ekstremalių reiškinių ir fiksuojamos tik pavienės žalos (Lietuvos agrarinės..., 2019). 2015 metais sausi periodai dirvožemyje fiksuoti sezono pabaigoje (3.39 pav.), o cukrinių runkelių derlius buvo mažesnis nei įprastai (9 priedas). 2015 metais sausos sąlygos buvo fiksuotos nuo antros sezono pusės, todėl tai galbūt ir galėjo paveikti cukrinių runkelių derlių, nes jie nuimami vėliau nei javai.

Apibendrinant galima teigti, kad sausi ir drėgni epizodai ne visada gali būti susiejami su faktine žala – derlingumo sumažėjimu. Pažymėtina, kad derlingumas pateikiamas kaip galutinis visų metų rezultatas ir susieti jį su ekstremaliais reiškiniais, vykusiais viso sezono metu, ne visada yra įmanoma. Svarbu ir reiškinų įvykio laikas, kuris gali skirtingai paveikti įvairios vystymosi fazės augalus.

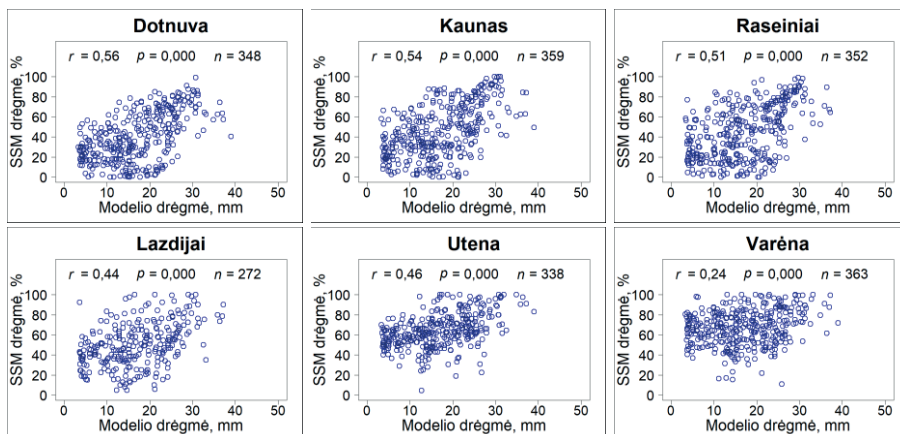
Nors ir sausų ar drėgnų sąlygų pasikartojimas, ypač sezono viduryje, gali būti sąlyginai siejamas su nuostoliu, tačiau yra ir metų, kada šie reiškiniai buvo, tačiau derlingumo nuokrypis nebuvo ženklus. Arba – netgi teigiamas, kaip 2002 ir ypač 2015 metais, kuriais sausi periodai dirvožemyje buvo sezono pabaigoje (3.39 pav.).

3.7. Palydovinės ir SWAP modelio dirvožemio drėgmės palyginimas

Šiame poskyryje analizuojamas dviejų palydovinių dirvožemio paviršiaus drėgmės produktų („Copernicus“ SSM ir ESA CCI SM) reikšmių glaudumas su SWAP modelio išvesties dirvožemio drėgme (viršutinių 5 cm dirvožemio sluoksnio storio) bei jų tarpusavio ryšys.

Pažymėtina, kad palydoviniai dirvožemio drėgmės produktai nėra tik išmatuotas dirvožemio drėgmės signalas. Produktui kurti taikomi modeliai, todėl palydovinis produktas yra modelio išvestis. Lyginant SWAP modelio dirvožemio drėgmę su palydoviniu drėgmės produktu iš esmės yra lyginamos dviejų modelių išvestys, tik SWAP modelio viena iš įvesčių yra meteorologiniai parametrai, o palydoviniams produktams kurti taikomų modelių viena iš įvesčių – jutikliais užfiksuotas žemės paviršiaus signalas.

SSM ir SWAP modelio dirvožemio drėgmės ryšys. Pirsono tiesinės koreliacijos ryšys r tarp SWAP modeliu sumodeliuotos dirvožemio drėgmės (mm) ir SSM palydovinės drėgmės (%) atskirose stotyse 2017–2020 metų gegužės–spalio mėnesiais kinta nuo 0,24 iki 0,56 (3.40 pav.). Visi ryšiai statistiškai patikimi ($p < 0,05$). Silpniausias ryšys nustatytas Varėnoje ($r = 0,24$). Galima daryti prielaidą, kad toks silpnas ryšys Varėnoje yra nulemtas to, jog didelę gardelės dalį dengia miškas (2.7 pav.), todėl kraštovaizdžio margumas gali lemti gauto signalo neapibrėžtumą.



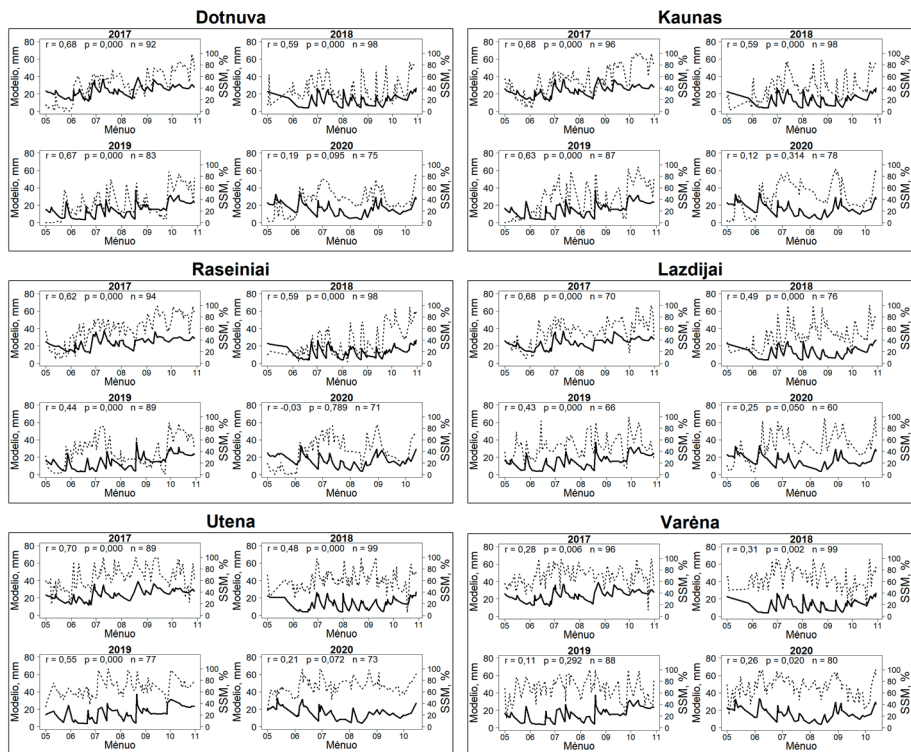
3.40 pav. Ryšys tarp SWAP modeliu sumodeliuotos (x ašis, mm) ir SSM palydovinės (y ašis, %) dirvožemio drėgmės produkto 2017–2020 metų gegužės–spalio mėnesiais. r – Pirsono tiesinės koreliacijos ryšys, p – tikimybė, n – matavimo porų skaičius.

Taip pat iki galo nėra aišku, ar SSM produkto generavimo ir modeliavimo procese yra naudojamas tinkamas žemėnaudos tipas atskirose vietose. Ypač tai svarbu, kai žemėnaudos tipas tarp atskirų metų gali ir pasikeisti. Remiantis SSM produkto validavimo duomenimis, miškingose, šalto klimato ar laikinai užliejamose teritorijose yra fiksuojama mažesnė SSM ir išmatuotos drėgmės atitiktis (Bauer-Marschallinger ir Massart, 2022).

SWAP modelio išvesties ir SSM produkto dirvožemio drėgmės duomenų ryšio glaudumo rezultatai yra panašūs į kitų tyrėjų Europoje gautus SSM produkto validavimo rezultatus. Lyginant SSM su kitose Europos vietose išmatuota dirvožemio drėgme, buvo nustatyti ryšiai, kurių glaudumas panašus kaip ir gautas šiame darbe (bendras $r = 0,30$ – $0,55$, o skirtingose stotyse gali būti $r = 0,80$) (Bauer-Marschallinger ir Massart, 2022).

Vertinant atskirus metus pastebima, kad 2017–2019 metais ryšys yra glaudesnis nei 2020 metais visose stotyse, išskyrus Varėną, kurioje 2019 metais

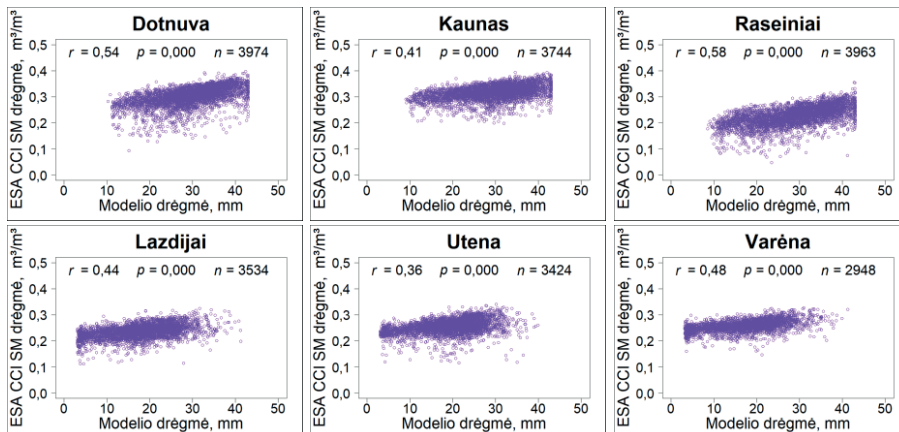
fiksuotas prasčiausias ryšys (3.41 pav.). Atskirais metais ryšys buvo gana stiprus (r apie 0,6–0,7). Teigiama, kad SSM produktas gana gerai identifikuoja staigų dirvožemio drėgmės sumažėjimą ir padidėjimą, todėl trumpalaikiams drėgmės pokyčiams įvertinti produktas gali būti taikomas (Bauer-Marschallinger ir Massart, 2022). Tačiau pagal turimus duomenis galima pastebėti, kad atskirais metais SSM ir modelio drėgmės kaitos tendencijos gali ir labai skirtis, todėl tokio produkto duomenų panaudojimas drėgmei vertinti yra ribotas.



3.41 pav. SWAP modeliui sumodeliuotos (juoda linija, mm, y ašis kairėje) ir SSM palydovinio produkto drėgmė (punktyrinė linija, %, y ašis dešinėje) 2017–2020 metų gegužės–spalio mėnesiais. r – Pirono tiesinės koreliacijos ryšys, p – tikimybė, n – stebėjimo porų skaičius.

ESA CCI SM ir SWAP modelio dirvožemio drėgmės ryšys. Ryšys tarp SWAP modelio ir ESA CCI SM dirvožemio drėgmės 1979–2020 metais: $r = 0,36–0,58$ (3.42 pav.). Visi ryšiai statistiškai reikšmingi. Vertinant atskirai 1979–2007 ir 2008–2020 metus, kurie itin skiriasi stebėjimų per sezoną skaičiumi (2.11 pav.), nustatyta, kad ryšiai labiau sustiprėjo tik ten, kur jie buvo silpniausi (Utenoje ir Varėnoje), o daugumoje stočių pasikeitė mažai (12 priedas). Tai reiškia, kad padidėjus informacijos iš skirtingų palydovų

kiekiui ESA CCI SM dirvožemio drėgmė netapo ženkliai artimesnė SWAP modelio reikšmėms. Be to, ESA CCI SM dirvožemio drėgmės produkto validavimas parodė, kad erdviniiu mastu dirvožemio drėgmė arba gerai siejasi su *in situ* duomenimis, arba labai prastai, tačiau nebuvo galima išskirti dėsningumų, nuo ko tai priklauso (Hirschi ir kt., 2020).

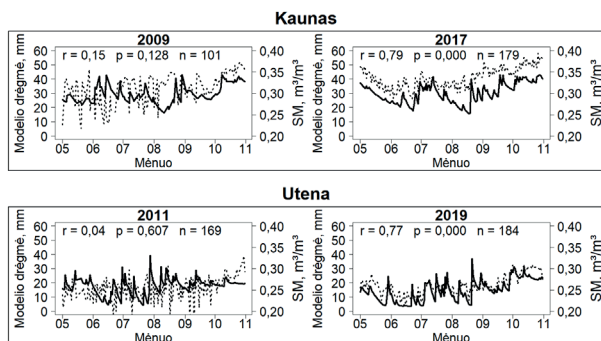


3.42 pav. Ryšys tarp SWAP modeliu sumodeliuotos (x ašis, mm) ir ESA CCI SM palydovinės (y ašis, m^3/m^3) dirvožemio drėgmės 1979–2020 metų gegužės–spalio mėnesiais. r – koreliacijos koeficientas, p – tikimybė, n – duomenų porų skaičius.

Atskirais metais palydovinė ir modelio dirvožemio drėgmė siejasi labiau. 12 priede pateikti Pirsono koreliacijos koeficientai atskirais metais. Galima pastebėti, kad antroje analizuojamo laikotarpio pusėje ryšio glaudumas didėja. Tais metais, kai ESA CCI SM dirvožemio drėgmės variacija yra ypač didelė, ryšys itin silpnas (3.43 pav.). Toks ryšio nepastovumas tarp ESA CCI SM ir modelio dirvožemio drėgmės atskirais metais apriboja palydovinių drėgmės duomenų panaudojimo galimybes.

SSM ir ESA CCI SM drėgmės ryšys. Vertinant ESA CCI SM ir SSM palydovinių produktų drėgmės duomenų ryšius nustatyta, kad Dotnuvoje, Kaune, Raseiniuose ir Lazdijuose koreliacinis ryšys yra 0,60–0,64 ($p < 0,05$), o Utenoje ir Varėnoje mažesnis – $r = 0,32$. SSM kaita per sezoną gali pasižymėti didele amplitude. Atskirais atvejais sezono pradžioje gali būti fiksuojamos minimalios (artimos nuliui) per visą sezoną drėgmės reikšmės, pavyzdžiui, Kaune 2017 metais, Raseiniuose 2020 metais (3.41 pav., 3.18 lentelė), o tai galėtų rodyti, kad pavasarį buvo ypač mažai drėgmės dirvožemyje, nors įprasta, kad sezono pradžioje po žiemos dirvožemis būna

drėgnesnis nei viduryje (3.12A pav.). Tačiau abiem šiais atvejais nei ESA CCI SM produkto, nei SWAP modelio drėgmės reikšmės (3.44 pav., 3.18 lentelė) tokia didelė amplitudė per sezoną, kaip SSM drėgmė, nepasizymėjo.

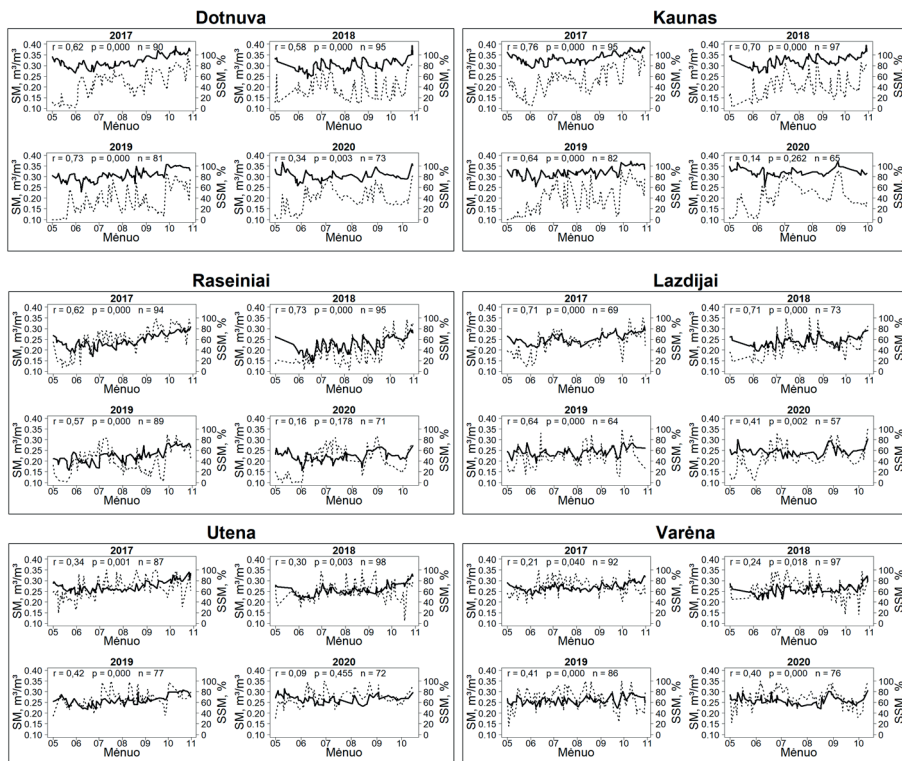


3.43 pav. SWAP modelio (juoda linija, mm, y ašis kairėje) ir ESA CCI SM dirvožemio drėgmė (punktyrinė linija, m^3/m^3 , y ašis dešinėje) Kaune ir Utenoje gegužės–spalio mėnesiais. Pateikti tie metai, kai r buvo mažiausias (kairėje) ir didžiausias (dešinėje) 2008–2020 metų gegužės–spalio mėnesiais. r – koreliacijos koeficientas, p – tikimybė, n – duomenų porų skaičius.

3.18 lentelė. Minimali, maksimali ir vidutinė palydovinių drėgmės produktų reikšmė 2017–2020 metų gegužės–spalio mėnesiais.

| Prod. | Rodiklis | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|-----------|----------|-------|-------|-------|-------|
| Dotnuva | | | | | |
| SSM | Min. | 0,5 | 8,5 | 0,0 | 2,0 |
| | Maks. | 99,0 | 85,0 | 87,5 | 83,5 |
| | Vid. | 47,4 | 38,6 | 34,4 | 39,0 |
| ESA | Min. | 0,259 | 0,240 | 0,228 | 0,238 |
| CCI | Maks. | 0,398 | 0,392 | 0,357 | 0,369 |
| SM | Vid. | 0,322 | 0,304 | 0,307 | 0,310 |
| Kaunas | | | | | |
| SSM | Min. | 4,5 | 2,5 | 0,0 | 0,0 |
| | Maks. | 100,0 | 87,5 | 96,0 | 92,5 |
| | Vid. | 55,1 | 44,1 | 39,1 | 43,0 |
| ESA | Min. | 0,287 | 0,262 | 0,252 | 0,257 |
| CCI | Maks. | 0,394 | 0,394 | 0,373 | 0,377 |
| SM | Vid. | 0,337 | 0,320 | 0,320 | 0,328 |
| Raseiniai | | | | | |
| SSM | Min. | 7,0 | 2,5 | 1,5 | 0,0 |
| | Maks. | 99,0 | 97,0 | 90,0 | 86,5 |
| | Vid. | 59,1 | 38,2 | 41,0 | 39,5 |
| ESA | Min. | 0,169 | 0,144 | 0,157 | 0,154 |
| CCI | Maks. | 0,313 | 0,295 | 0,292 | 0,297 |
| SM | Vid. | 0,243 | 0,224 | 0,226 | 0,229 |
| Lazdijai | | | | | |
| SSM | Min. | 8,0 | 15,5 | 11,0 | 5,0 |
| | Maks. | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| | Vid. | 54,7 | 49,4 | 48,8 | 49,5 |
| ESA | Min. | 0,197 | 0,186 | 0,182 | 0,207 |
| CCI | Maks. | 0,309 | 0,317 | 0,290 | 0,303 |
| SM | Vid. | 0,252 | 0,240 | 0,241 | 0,249 |
| Utena | | | | | |
| SSM | Min. | 19,0 | 4,5 | 34,5 | 30,5 |
| | Maks. | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| | Vid. | 64,4 | 59,9 | 65,9 | 67,9 |
| ESA | Min. | 0,225 | 0,211 | 0,216 | 0,219 |
| CCI | Maks. | 0,340 | 0,331 | 0,309 | 0,325 |
| SM | Vid. | 0,274 | 0,256 | 0,261 | 0,267 |
| Varėna | | | | | |
| SSM | Min. | 11,0 | 16,5 | 15,5 | 22,0 |
| | Maks. | 99,5 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| | Vid. | 68,9 | 65,2 | 65,9 | 69,9 |
| ESA | Min. | 0,225 | 0,210 | 0,217 | 0,203 |
| CCI | Maks. | 0,323 | 0,322 | 0,314 | 0,305 |
| SM | Vid. | 0,268 | 0,256 | 0,257 | 0,259 |

Atskirais metais abiejų palydovinių dirvožemio produktų drėgmės reikšmių ryšys r gali būti stiprus ir viršyti 0,7. Tačiau buvo nemažai metų, kai ryšys buvo silpnas ir statistškai nereikšmingas (3.44 pav.).



3.44 pav. Dirvožemio drėgmė pagal ESA CCI SM (juoda kreivė, m^3/m^3) ir pagal SSM (punktyrinė kreivė, %) 2017–2020 metų gegužės–spalio mėnesiais. r – koreliacijos koeficientas, p – tikimybė, n – duomenų porų skaičius.

Tikėtina, kad silpnas palydovinių dirvožemio duomenų ryšys su SWAP modelio dirvožemio drėgme gali būti nulemtas dirvožemio drėgmės palydovinių matavimų problema. Palydovinių drėgmės duomenų kokybę gali nulemti augalinės dangos pokyčiai sezono metu, atspindžio nuo žemės paviršiaus interpretavimo ir konvertavimo į drėgmės išraišką algoritmai bei palydovinės gardelės dydis, dėl kurio drėgmės signalas užfiksuojamas iš įvairialypio žemės paviršiaus. Taip pat palydoviniai produktai neatsižvelgia į dirvožemio savybes, kurios gali būti susijusios su drėgmės režimu. Pavyzdžiui, SSM produkto drėgmės reikšmės yra apskaičiuojamos naudojant išmatuotą istoriškai absoliučiai didžiausią ir mažiausią reikšmes ir skaičiavimas nėra susiejamas su konkretnėmis paviršiaus ar dirvožemio

savybėmis, nors teigiama, kad santykinė drėgmės išraiška (%) gali būti konvertuojama į volumetrinę drėgmę (m^3/m^3) naudojant dirvožemio poringumo duomenis (Bauer-Marschallinger ir Paulik, 2019). Tačiau dirvožemio poringumas apibūdina lokalias dirvožemio savybes, o palydoviniai, ypač ESA CCI SM, duomenys pasižymi prasta skiriamąja geba.

Tai, jog atskirais atvejais ESA CCI SM drėgmės produkto duomenys yra artimesni modelio reikšmėms nei SSM produkto, gali būti nulemta ESA CCI SM produkto sukūrimo sujungiant įvairių palydovinių jutiklių ir mažesnės skiriamosios gebos duomenis. Didesnės skiriamosios gebos duomenyse yra didesnė tikimybė matavimo klaidų, kurios galutinei visos gardelės reikšmei turi didesnį poveikį nei tuose produktuose, kurių skiriamoji geba yra mažesnė (Adegoke ir Carleton, 2002).

Laikant, kad SWAP modeliu sumodeliuota dirvožemio drėgmė yra tinkama drėgmės sąlygoms dirvožemyje vertinti, ESA CCI SM ir ypatingai SSM palydoviniai drėgmės produktų duomenys kol kas nusileidžia patikimumu, yra ribojami palydovinių dirvožemio drėgmės matavimų specifikos, todėl tokių duomenų panaudojimas yra ribotas. Be to, reanalizės (kitaip – modelio) duomenys gali geriau sietis su *in situ* drėgme nei palydovinis ESA CCI SM produktas (Hirschi ir kt., 2020). Dėl visų išvardytų priežasčių, kol kas drėgmės sąlygas dirvožemyje galima geriau apibūdinti SWAP modeliu, tačiau tobulėjantys palydovinių duomenų algoritmai ateityje gali padidinti šių duomenų patikimumą ir pritaikomumą.

3.8. Prognozuojami dirvožemio drėgmės pokyčiai XXI amžiuje

Šiame poskyryje pateikiamos vidutinės oro temperatūros, kritulių kiekio, modeliuotos dirvožemio drėgmės ir ekstremalių meteorologinių sąlygų 2020–2099 metų gegužės–spalio mėnesiais prognozės. Visų rodiklių prognozės sudarytos pagal du klimato scenarijus: RCP4.5 ir RCP8.5. Naudojami dviejų globalių klimato modelių (MOHC ir MPI) regioninės (RCA4) realizacijos išvesties duomenys. Rodiklių pokyčiai įvertinti naudojant atskirų dvidešimtmečių (2020–2039, 2040–2059, 2060–2079 ir 2080–2099 metų) nuokrypį nuo 1970–2005 metų vidurkio.

3.8.1. Oro temperatūros, kritulių ir dirvožemio drėgmės prognozės

Remiantis dviejų klimato modelių pagal du klimato scenarijus (RCP4.5 ir RCP8.5) duomenimis, vidutinė oro temperatūra analizuojamu sezonu (gegužės–spalio mėnesiai) iki XXI amžiaus pabaigos visose stotyse statistiškai reikšmingai išaugs (3.19 lentelė). Pagal RCP4.5 scenarijų vidutinis pokytis visose stotyse numatomas mažesnis nei pagal RCP8.5, o pagal MPI pokyčiai numatomi mažesni nei pagal MOHC. Prognozuojama, jog iki amžiaus pabaigos vidutinė gegužės–spalio mėnesio temperatūra išaugs (palyginti su 1970–2005 metų vidurkiu) 1,5–2,9 °C pagal RCP4.5 klimato scenarijų ir 2,8–4,9 pagal RCP8.5.

Atskirų mėnesių oro temperatūra pagal RCP4.5 ir RCP 8.5 scenarijus taip pat kils ir visi numatomi pokyčiai yra statistiškai reikšmingi. Pagal RCP4.5 scenarijų ir MOHC modelį amžiaus pabaigoje labiausiai sušils rugpjūtis ir spalio (bent 3 °C šilčiau nei 1970–2005 metų vidurkis). Pagal MPI pokyčiai bus mažesni, o didžiausi pokyčiai numatomi birželį (iki 2 °C šilčiau amžiaus pabaigoje).

Pagal MOHC modelio pesimistinį RCP8.5 scenarijų labiausiai sušils birželis, rugsėjis ir spalio (bent 5 °C) (3.45 pav., 13 priedas, 14 priedas, 15 priedas, 16 priedas). Tačiau pagal MPI atskirais mėnesiais pokyčiai bus mažesni ir tik rugpjūtį bei spalį sieks iki +3 °C.

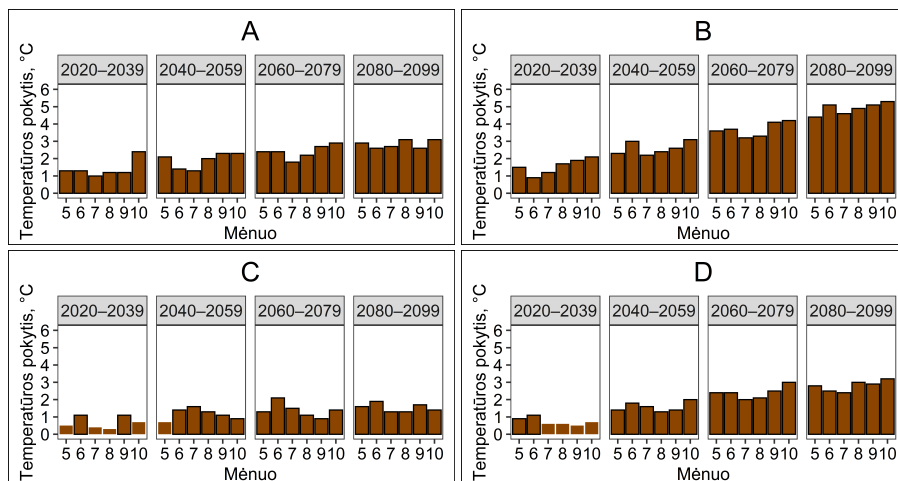
Nors galimi pokyčių dydžiai pasižymi dideliu neapibrėžtumu ir priklauso nuo naudojamo scenarijaus ir modelio, tačiau bendra oro temperatūros augimo tendencija yra labai aiški. Didesni vidutinės oro temperatūros pokyčiai numatomi antrai sezono pusei (3.45 pav.).

Prognozuojami sezoniniai kritulių kiekio pokyčiai nėra tokie vienareikšmiai kaip temperatūros. Numatomi kritulių pokyčiai skiriasi tiek priklausomai nuo klimato scenarijaus, tiek nuo modelio. Dauguma pokyčių nėra statistiškai reikšmingi ir daugiau statistiškai reikšmingų pokyčių numatoma pagal MOHC, nei pagal MPI modelio išvesties duomenis.

Pagal MOHC modelį visose analizuojamose stotyse gegužės–spalio mėnesiais kritulių kiekis daugiausia turėtų išaugti. Kritulių kiekis iki amžiaus pabaigos išaugs 5–17 %. Mažiausi teigiami pokyčiai numatomi Lietuvos pietuose esančiuose Lazdijuose bei Varėnoje. Šiauriau esančiuose stotyse pokyčiai bus didesni. Tai atitinka bendras regionines tendencijas. Numatoma, jog vasarą Europos šiaurėje kritulių kiekis didės, o pietuose mažės. Vasaros metu pereinamoji zona iš neigiamos tendencijos į teigiamą pasislenka į šiaurę ir Lietuva atsiduria pereinamojoje zonoje (EEA, 2022).

3.19 lentelė. Vidutinės dvidešimtmečių oro temperatūros (°C), kritulių kiekio (%) ir dirvožemio drėgmės (%) pokytis gegužės–spalio mėnesiais, palyginti su 1970–2005 metų vidurkiu. Pokytis apskaičiuotas pagal du klimato kaitos scenarijus (RCP4.5 ir RCP8.5) ir MPI bei MOHC modelių išvesties duomenis. Statistiškai reikšmingi pokyčiai pagal Mano-Vitnio-Vilkoksono rangų sumos kriterijų ($p < 0,05$) pažymėti pilkai.

| Stotis | | Dotnuva | Kaunas | Raseiniai | Lazdijai | Utena | Varena | Dotnuva | Kaunas | Raseiniai | Lazdijai | Utena | Varena |
|-------------------|-------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------|-------------|------------|
| Scen. | Metai | MOHC | | | | | | MPI | | | | | |
| Oro temperatūra | | | | | | | | | | | | | |
| RCP4.5 | 20–39 | 1,5 | 1,4 | 1,5 | 1,4 | 1,5 | 1,3 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 |
| | 40–59 | 2,0 | 1,9 | 2,0 | 1,9 | 1,9 | 1,9 | 1,1 | 1,2 | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,2 |
| | 60–79 | 2,5 | 2,4 | 2,5 | 2,5 | 2,4 | 2,4 | 1,4 | 1,4 | 1,3 | 1,4 | 1,4 | 1,5 |
| | 80–99 | 2,9 | 2,8 | 2,9 | 2,8 | 2,9 | 2,8 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,6 | 1,5 | 1,6 |
| RCP8.5 | 20–39 | 1,6 | 1,6 | 1,6 | 1,6 | 1,6 | 1,5 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 |
| | 40–59 | 2,6 | 2,6 | 2,6 | 2,6 | 2,6 | 2,6 | 1,6 | 1,6 | 1,5 | 1,5 | 1,6 | 1,6 |
| | 60–79 | 3,8 | 3,7 | 3,8 | 3,8 | 3,8 | 3,7 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 |
| | 80–99 | 4,9 | 4,9 | 5,0 | 4,9 | 4,9 | 4,9 | 2,8 | 2,8 | 2,8 | 2,8 | 2,8 | 2,9 |
| Kritulių kiekis | | | | | | | | | | | | | |
| RCP4.5 | 20–39 | 10,0 | 9,1 | 15,2 | 8,8 | 8,1 | 13,1 | 8,3 | 8,3 | 10,8 | 7,5 | 8,5 | 8,2 |
| | 40–59 | 3,9 | 3,6 | 6,4 | 0,8 | 7,5 | 2,8 | 4,3 | -1,0 | 3,7 | -5,5 | 5,1 | -5,4 |
| | 60–79 | 15,7 | 17,2 | 13,4 | 10,3 | 15,2 | 15,6 | -1,6 | -2,7 | 4,2 | -2,9 | 3,3 | -0,4 |
| | 80–99 | 9,6 | 9,4 | 12,3 | 6,1 | 13,0 | 11,2 | -2,2 | -4,3 | 1,5 | -8,5 | 2,1 | -9,8 |
| RCP8.5 | 20–39 | 11,5 | 10,3 | 12,5 | 9,7 | 9,8 | 12,7 | 9,6 | 6,1 | 13,7 | 4,0 | 6,3 | 3,8 |
| | 40–59 | 6,6 | 2,1 | 5,3 | -0,9 | 4,4 | -0,3 | 2,9 | -1,8 | 3,8 | -1,5 | 8,2 | 1,5 |
| | 60–79 | 16,3 | 14,2 | 18,9 | 12,3 | 14,0 | 16,8 | 3,5 | 2,1 | 7,0 | -1,8 | 8,6 | 1,3 |
| | 80–99 | 16,9 | 8,4 | 15,8 | 7,7 | 10,4 | 4,6 | 21,1 | 17,2 | 20,8 | 8,1 | 18,2 | 8,9 |
| Dirvožemio drėgmė | | | | | | | | | | | | | |
| RCP4.5 | 20–39 | 3,6 | 4,7 | 5,7 | 7,8 | 2,7 | 8,6 | 3,2 | 4,9 | 4,7 | 6,0 | 8,0 | 8,6 |
| | 40–59 | 0,4 | 0,0 | 1,3 | -2,8 | 1,4 | -2,5 | -0,3 | -3,0 | -0,9 | -7,2 | 2,1 | -6,0 |
| | 60–79 | 3,5 | 4,6 | 2,0 | 1,4 | 8,0 | 5,5 | -1,0 | -1,9 | 2,2 | -3,4 | 3,6 | -1,8 |
| | 80–99 | -0,3 | 0,0 | 1,2 | -1,3 | 0,1 | 1,1 | -2,4 | -4,2 | -1,4 | -11,6 | -0,6 | -11,1 |
| RCP8.5 | 20–39 | 3,5 | 2,7 | 3,5 | 4,0 | 5,3 | 6,4 | 3,9 | 2,5 | 6,8 | -0,1 | 4,8 | 1,0 |
| | 40–59 | -1,4 | -3,9 | -1,7 | -7,3 | -2,5 | -7,1 | 1,0 | -2,3 | 1,2 | -4,4 | 7,2 | -0,3 |
| | 60–79 | 1,6 | 1,2 | 3,1 | 0,8 | 2,5 | 3,0 | -0,3 | -0,1 | 0,7 | -4,2 | 6,4 | 0,4 |
| | 80–99 | -1,6 | -4,6 | -1,2 | -5,3 | -3,8 | -8,0 | 7,3 | 8,3 | 7,5 | 3,5 | 14,5 | 7,6 |

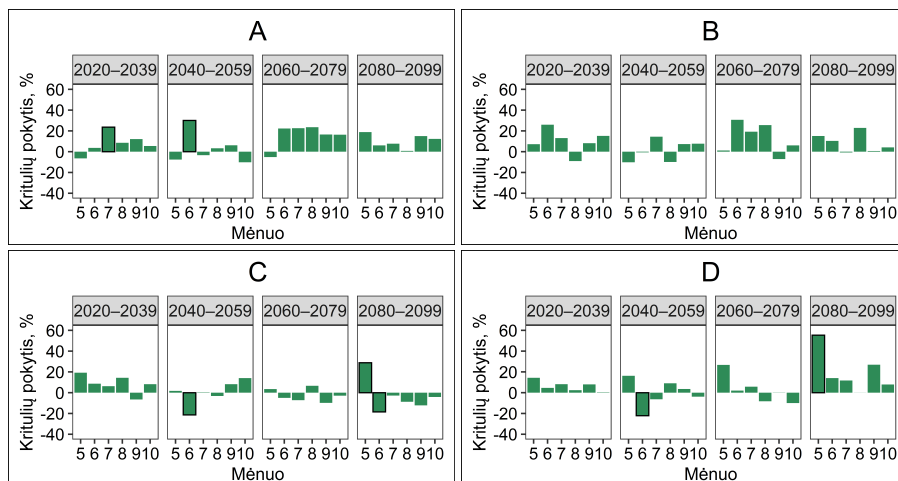


3.45 pav. Vidutinis dvidešimtmečių oro temperatūros pokytis (°C) gegužės–spalio mėnesiais, palyginti su 1970–2005 metų vidurkiu Kaune: MOHC RCP4.5 (A), MOHC RCP8.5 (B) bei MPI RCP4.5 (C), MPI RCP8.5 (D). Statistiškai reikšmingi pokyčiai pagal Mano-Vitnio-Vilkoksono rangų sumos kriterijų ($p < 0,05$) apvesti juodai.

Pagal MPI modelio RCP4.5 scenarijų amžiaus pabaigoje kritulių kiekis sumažės keturiuose iš šešių analizuojamųjų stočių (iki -10% Varėnoje), o pagal RCP8.5 kritulių kiekis amžiaus pabaigoje išaugs (iki 20% Raseiniuose ir Dotnuvoje). Didesni ir daugiausia statistiškai reikšmingi pokyčiai prognozuojami tik tai amžiaus pabaigoje. Visais atvejais šiauriau esančiose stotyse prognozuojami didesni teigiami pokyčiai (3.19 lentelė).

Nors numatomas bendras sezoninis kritulių kiekio pokytis daugiausia yra teigiamas (išskyrus MPI modelį pagal RCP4.5 klimato scenarijų), tačiau atskirais mėnesiais kritulių gali sumažėti (3.46 pav., 13 priedas, 14 priedas, 15 priedas, 16 priedas). Absoliuti dauguma pokyčių nėra statistiškai reikšmingi.

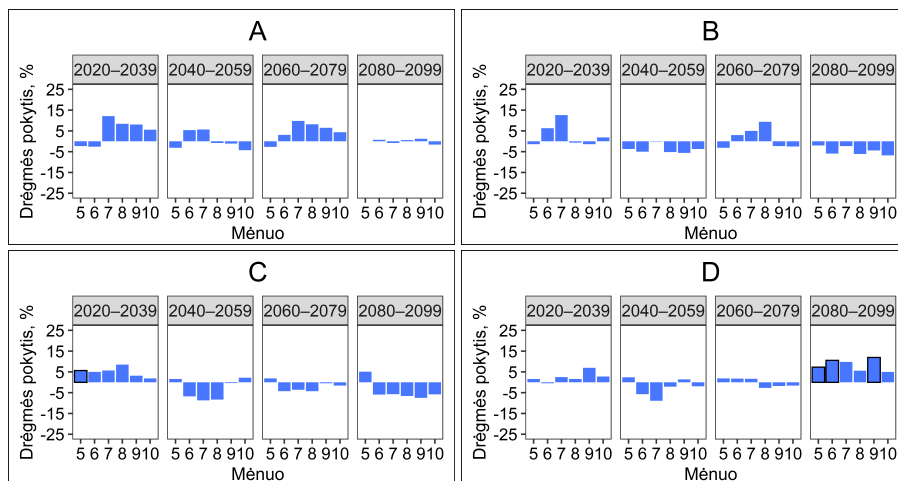
Pagal RCP4.5 scenarijų, amžiaus viduryje gegužę ir spalį, palyginti su 1970–2005 metais, numatomas mažesnis kritulių kiekis (iki -12 %), o birželį – didesnis (iki 31 %) (pagal MOHC). Tačiau amžiaus pabaigoje daugiau kritulių gali būti gegužės, rugsėjo ir spalio mėnesiais. Pagal MPI ryškesni ir teigiami pokyčiai numatomi gegužės mėnesiui (iki 42 % daugiau kritulių). O likusiais mėnesiais amžiaus pabaigoje, ypač birželį bei rugsėjį, kritulių kiekis gali ir sumažėti.



3.46 pav. Vidutinis dvidešimtmečių kritiškumo kiekio pokytis (%) gegužės–spalio mėnesiais, palyginti su 1970–2005 metų vidurkiu Kaune: MOHC RCP4.5 (A), MOHC RCP8.5 (B) bei MPI RCP4.5 (C), MPI RCP8.5 (D). Statistiškai reikšmingi pokyčiai pagal Mano-Vitnio-Vilkoksono rangų sumos kriterijų ($p < 0,05$) apvesti juodai.

Pagal RCP8.5 amžiaus viduryje gegužę ir birželį gali būti iki 20 % mažiau kritiškumo (pagal MOHC), tačiau amžiaus antroje pusėje teigiamas kritiškumo kiekio pokytis gali būti visais mėnesiais. O pagal MPI modelį iki XXI amžiaus pabaigos gegužę kritiškumo kiekis numatomas didesnis, nei buvo 1970–2005 metais, o ypač dideli teigiami pokyčiai gegužės, rugsėjo ir spalio mėnesiais numatomi amžiaus pabaigoje (iki 59 % daugiau).

Dirvožemio drėgmės pokyčiai iki XXI amžiaus pabaigos vertinami pagal SWAP modelio išvesties reikšmes, sumodeliuotas naudojant oro temperatūros ir kritiškumo prognozes. Analizuojant numatomus vidutinės dirvožemio drėgmės gegužės–spalio mėnesiais pokyčius nustatytos vos kelios statistiškai reikšmingos permainos amžiaus pabaigoje pagal RCP8.5 (3.19 lentelė). Pagal RCP4.5 klimato scenarijų amžiaus pabaigoje vidutinė dirvožemio drėgmė turėtų pasikeisti labai mažai (MOHC) arba sumažėti iki 12 % (MPI), o pagal RCP8.5 pokyčių neapibrėžtumas didesnis: dirvožemio drėgmė gali būti iki 4 % mažesnė priemolinguose ir iki 8 % mažesnė priemolinguose dirvožemiuose remiantis MOHC modelio išvesties duomenimis arba, žymiai išaugus kritiškumo kiekiui, dirvožemio drėgmė gali irgi išaugti (iki 15 % pagal MPI).



3.47 pav. Vidutinis dvidešimtmečių dirvožemio drėgmės pokytis (%) gegužės–spalio mėnesiais, palyginti su 1970–2005 metų vidurkiu Kaune: MOHC RCP4.5 (A), MOHC RCP8.5 (B) bei MPI RCP4.5 (C), MPI RCP8.5 (D). Statistiškai reikšmingi pokyčiai pagal Mano-Vitnio-Vilkoksono rangų sumos kriterijų ($p < 0,05$) apvesti juodai.

Nors vidutiniai sezono dirvožemio drėgmės pokyčiai nėra ypač ryškūs, tačiau drėgmės sąlygos persiskirstys sezono viduryje (3.47 pav., 13 priedas, 14 priedas, 15 priedas, 16 priedas). Pagal RCP4.5 klimato scenarijų ir MOHC modelį amžiaus pabaigoje pirma sezono pusė (gegužė–liepa) gali tapti sausesnė (iki 6 %), o pabaiga – drėgnesnė (iki 6 %), o pagal MPI amžiaus pabaigoje visais mėnesiais, išskyrus gegužę, dirvožemio drėgmė sumažės (daugiausia iki 19 %). Gegužės mėnesį drėgmė gali išaugti iki 7 %.

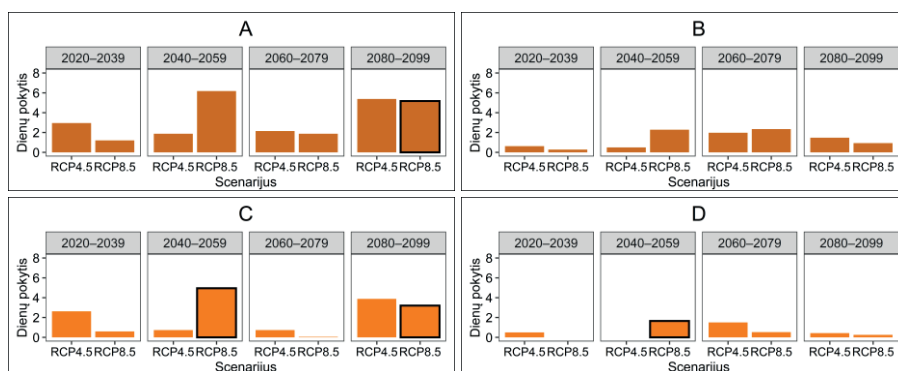
Tačiau pagal RCP8.5 klimato scenarijų numatomi drėgmės pokyčiai pagal du analizuojamus modelius išsiskiria. Pagal MOHC amžiaus pabaigoje drėgmės sumažėjimas numatomas visais mėnesiais, o didžiausi pokyčiai gali būti birželio ir spalio mėnesiais (iki 15 %). O pagal MPI amžiaus pabaigoje numatomi teigiami dirvožemio drėgmės pokyčiai ir didžiausi jie turėtų būti birželį, liepą ir rugsėjį (iki 19 %).

Toks didelis galimų sezoninių drėgmės pokyčių neapibrėžtumas rodo, kad ateityje kartu su klimato kaita kils ir dirvožemio drėgmės sąlygos. Tačiau pokyčio dydis ir ženklas priklausys nuo to, kaip keisis oro temperatūra ir krituliai bei jų tarpusavio santykis.

3.8.2. Ekstremalių meteorologinių sąlygų pasikartojimas ir dirvožemio drėgmė jų metu

Analizuojant, kaip ateityje keisis sausrų pagal TPI15, TPI30 ir sausrų periodų dirvožemyje pagal 5-tą procentilį pasikartojimas, vertinamas vidutinis dienų su šiais reiškiniais skaičiaus per dešimtmetį pokytis, palyginti su 1970–2005 metų laikotarpiu.

Nustatyta, kad pagal abu scenarijus ir abu modelius XXI amžiaus pabaigoje bus daugiau dienų su sausromis, identifikuotomis pagal TPI15 ir TPI30. Pokytis priklauso tiek nuo stoties, tiek nuo prognozuojamo laikotarpio. Amžiaus pabaigoje statistiškai reikšmingai turėtų išaugti TPI15 sausrų dienų skaičius (3.48 pav., 17 priedas, 18 priedas). Pagal RCP8.5 scenarijų numatoma daugiau tokių dienų nei pagal RCP4.5.

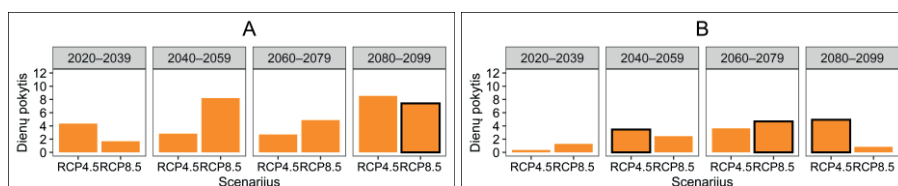


3.48 pav. Dienų su TPI sausra gegužės–spalio mėnesiais skaičiaus per dešimtmetį pokytis Kaune atskirais dvidešimtmečiais, palyginti su 1970–2005 metų vidurkiu: TPI15 MOHC (A), TPI15 MPI (B) bei TPI30 MOHC (C), TPI30 MPI (D). Statistiškai reikšmingi pokyčiai pagal Mano-Vitnio-Vilkoksono rangų sumos kriterijų ($p < 0,05$) apvesti juodai.

Sausrų pokyčius ateityje galima susieti su numatomais oro temperatūros ir kritulių kiekiu pokyčiais. Pagal MOHC numatomas didesnis dienų su sausra skaičiaus padidėjimas nei pagal MPI būtent todėl, kad prognozuojamas spartesnis oro temperatūros kilimas (3.19 lentelė). Mažai tikėtina, kad išaugęs kritulių kiekis atsvers kylančios oro temperatūros poveikį, todėl amžiaus pabaigoje pagal šį scenarijų tikėtina statistiškai reikšmingai daugiau dienų su TPI15 ir su TPI30.

Dienų su sausais periodais dirvožemyje pagal 5-tą procentilį skaičius iki XXI amžiaus pabaigos augs (3.49 pav., 19 priedas). Pagal RCP4.5 scenarijų amžiaus pabaigoje dienų skaičius su sausu periodu gali būti iki 11 dienų (MOHC) ar iki 6 dienų (MPI) per dešimtmetį didesnis nei 1970–2005 metais.

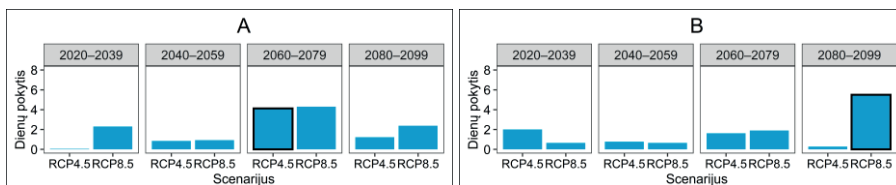
Pagal RCP8.5 scenarijų numatoma, kad amžiaus pabaigoje dienų su sausu periodu dirvožemyje skaičius gali išaugti pagal MOHC iki 7 dienų. Pagal MPI ryškesnių pokyčių nenumatoma, kadangi tuomet prognozuojamas ženklus ir reikšmingas kritulių kiekio augimas ir mažiau stiprus oro temperatūros pokytis (3.19 lentelė). Didesni skirtumai tarp numatomų pokyčių priemėlinguose ir priemolinguose dirvožemiuose nenumatyti.



3.49 pav. Dienų su sausu periodu dirvožemyje pagal 5-tą procentilį gegužės–spalio mėnesiais skaičiaus per dešimtmetį pokytis Kaune atskirais dvidešimtmečiais, palyginti su 1970–2005 metų vidurkiu pagal MOHC (A) ir MPI (B) modelių išvesties duomenis ir RCP4.5 ir RCP8.5 klimato scenarijus. Statistiškai reikšmingi pokyčiai pagal Mano-Vitnio-Vilkoksono rangų sumos kriterijų ($p < 0,05$) apvesti juodai.

Ilgą lietingo laikotarpio dienų skaičius analizuojamose stotyse iki XXI amžiaus pabaigos turėtų išaugti, palyginti su 1970–2005 metais, tačiau tik maža dalis prognozuojamų pokyčių yra statistiškai reikšmingi. Didesni dienų su ilgu lietingu laikotarpiu pokyčiai numatomi antroje amžiaus pusėje (3.50 pav., 20 priedas). Dienų su ilgu lietingu laikotarpiu skaičiaus pokyčiai daugiausia priklauso nuo kritulių kiekio pokyčių.

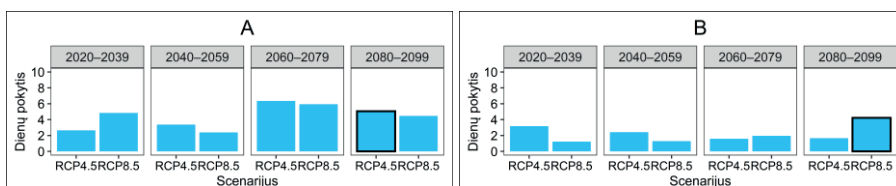
Pagal RCP8.5 scenarijų numatomi statistiškai reikšmingi pokyčiai tiek kritulių kiekio, tiek dienų su ilgu lietingu laikotarpiu yra didesni nei pagal RCP4.5. Ypač didelis dienų pokytis (iki 8 dienų daugiau) numatomas amžiaus pabaigoje pagal MPI modelį, kai ir kritulių kiekis, tikėtina, smarkiai išaugs (iki 21 %) (3.19 lentelė). O pagal MOHC, remiantis abiem scenarijais, numatoma, kad amžiaus pabaigoje per metus dienų su ilgu lietingu laikotarpiu gali būti iki 4 daugiau.



3.50 pav. Dienų su ilgu lietingu laikotarpiu gegužės–spalio mėnesiais skaičiaus per dešimtmetį pokytis Kaune atskirais dvidešimtmečiais, palyginti su 1970–2005 metų vidurkiu pagal MOHC (A) ir MPI (B) modelių bei RCP4.5 ir RCP8.5 klimato scenarijų išvesties duomenis. Statistiškai reikšmingi pokyčiai pagal Mano-Vitnio-Vilkoksono rangų sumos kriterijų ($p < 0,05$) apvesti juodai.

Dienų su drėgnu periodu dirvožemyje pagal 95-tą procentilį, kaip ir ilgų lietingų laikotarpių, iki XXI amžiaus pabaigos skaičius didės. Dauguma statistiškai reikšmingų pokyčių numatomi amžiaus pabaigoje.

Pagal RCP4.5 scenarijų amžiaus pabaigoje gali būti iki 7 dienų (MOHC) ar 5 dienų (MPI) su drėgnu periodu daugiau nei 1970–2005 metais (3.51 pav.).



3.51 pav. Dienų su drėgnu periodu dirvožemyje pagal 95-tą procentilį gegužės–spalio mėnesiais skaičiaus per dešimtmetį pokytis Kaune atskirais dvidešimtmečiais, palyginti su 1970–2005 metų vidurkiu pagal MOHC (A) ir MPI (B) modelių bei RCP4.5 ir RCP8.5 klimato scenarijų išvesties duomenis. Statistiškai reikšmingi pokyčiai pagal Mano-Vitnio-Vilkoksono rangų sumos kriterijų ($p < 0,05$) apvesti juodai.

Pagal RCP8.5 klimato scenarijų amžiaus pabaigoje tokių dienų skaičius bus 3 (MOHC) – 7 dienomis (MP) didesnis (3.51 pav., 21 priedas). Amžiaus pabaigoje numatomas didžiausias galimas dienų su drėgnu periodu skaičiaus pokytis pagal MPI modelį gali būti siejamas su kritulių kiekio augimu, ypač pagal RCP8.5 scenarijų (3.19 lentelė).

Apibendrinant klimato pokyčių tendencijas analizuotose stotyse galima teigti, kad vidutinė sezono (gegužės–spalio mėnesiai) oro temperatūra iki XXI amžiaus pabaigos statistiškai reikšmingai išaugs, pokytis numatomas didesnis pagal RCP8.5 nei RCP4.5 scenarijų. Kiti tyrimai patvirtina, kad vidutinės oro

temperatūros pokyčiai XXI amžiuje bus teigiami. Numatomi oro temperatūros pokyčiai Lietuvoje atitinka bendras Baltijos jūros regiono tendencijas – tolesnį oro temperatūros kilimą, kuris numatomas tiek pagal RCP4.5 scenarijų, tiek pagal RCP8.5 (Christensen ir kt., 2022; Piniewski ir kt., 2017).

Kritulių kiekio prognostiniai pokyčiai nėra tokie vienareikšmiai kaip oro temperatūros. Bendras sezoninis kritulių kiekis augs, ypač amžiaus pabaigoje, tačiau kritulių kiekio pasiskirstymas per sezoną keisis, o pokyčiai labai varijuoja priklausomai nuo klimato scenarijaus ir modelio. Kritulių kiekio pokyčio atžvilgiu Lietuva regioniniu mastu yra kritulių kiekio augimo vasaros sezonu zonos paribyje, ir tai parodo didelį galimą pokyčių neapibrėžtumą (Christensen ir kt., 2022; Piniewski ir kt., 2017).

Numatomi dirvožemio drėgmės pokyčiai pasižymi dar didesniu neapibrėžtumu, nes priklauso nuo oro temperatūros ir kritulių kiekio pokyčių komplekso. Nepaisant numatomo kritulių kiekio augimo, paviršiaus dirvožemio drėgmės pokyčiai, ypač mažėjimas, pagal RCP8.5 scenarijų amžiaus viduryje ir pabaigoje numatomas visame šiaurės Europos regione. Didžiausi regioniniai dirvožemio drėgmės pokyčiai numatomi balandžio ir gegužės mėnesiais (iki -7 %), o ypač mažų dirvožemio drėgmės reikšmių pasikartojimas visais metų sezonais, ypatingai pavasarį, gali išaugti 20 % (Ruosteenoja ir kt., 2018). Nors sezoninis kritulių kiekis ir gali išaugti, o tai lems dažnesnius ilgus lietingus laikotarpius ir drėgnus periodus dirvožemyje, tačiau tuo pačiu metu daugės ir sausrų, ir sausų dirvožemio periodų, nulemtų kritulių kiekio persiskirstymo per sezoną. Realizuojantis pesimistiškiausiam scenarijui (RCP8.5) sausrų ir ekstremalių kritulių sąlygų iki XXI amžiaus pabaigos daugės (Stevenson ir kt., 2022).

Ekstremalios perteklinės drėgmės sąlygos taip pat dažnės. Nustatyta, kad globaliu mastu dėl papildomo dirvožemio užmirkimo nuostoliai žemės ūkyje gali išaugti 10–20 % 2080 metais, ir nuostolių dydis priklausys nuo užmirkimo laiko, trukmės ir augalų augimo fazės (Liu ir kt., 2023). Augantis dirvožemio drėgmės deficitas kaimyninėse šalyse darys poveikį įvairiems žemės ūkio augalams tiek pagal RCP4.5, tiek RCP8.5, dėl to žemės ūkio augalų plotų su drėgmės deficitu gali padvigubėti (Sawicka ir kt., 2022).

Tai, kas praeityje buvo laikoma ekstremalumu, ateityje gali tapti norma (Stevenson ir kt., 2022). Dienų tiek sausomis, tiek drėgnomis dirvožemio sąlygomis skaičiaus augimas rodo ateityje didėsiantį klimato ekstremalumą ir dažnesnes nepalankias sąlygas žemės ūkiui ir kitoms sferoms.

IŠVADOS

1. SWAP modeliu sumodeliuota dirvožemio drėgmė yra artima išmatuotai drėgmei ($r = 0,67-0,86, p < 0,05$), todėl modelis tinka drėgmei modeliuoti priemolinguose ir priesmėlinguose dirvožemiuose. Nepaisant tam tikrų modeliuotos ir išmatuotos drėgmės skirtumų, modelis tinkamai reaguoja į trumpalaikius oro temperatūros ir ypač kritulių pokyčius. Pavieniai didesni skirtumai tarp modelio ir matavimų drėgmės gali būti nulemti ir drėgmės matavimo netikslumų.
2. Nustatyta, kad analizuojamu 1951–2020 metų laikotarpiu vidutinė atskirų mėnesių dirvožemio drėgmė vegetacijos sezono pradžioje (gegužės ir birželio mėnesiais) sumažėjo (pokytis iki 18 %), o liepos mėnesį išaugo. Toks dirvožemio drėgmės pokytis iš dalies atitinka kritulių kiekio pokyčius ir persiskirstymą šiltojo sezono metu.
3. Viso analizuojamo sezono metu dirvožemio drėgmės reikšmės labiausiai lemia prieš tai buvusių 20–30 dienų oro temperatūros ir kritulių santykis (skirtingose stotyse $r = 0,67-0,72, p < 0,05$). Sezono viduryje (liepą, rugpjūtį) tokia pat svarbi tampa kritulių suma ($r = 0,79-0,81, p < 0,05$), o oro temperatūros poveikis nežymiai susilpnėja. Gausių kritulių ir periodų be kritulių poveikis dirvožemio drėgmei priklauso nuo prieš tai buvusios drėgmės kiekio. Priemolingų dirvožemių drėgmę toks pat kritulių kiekis padidina daugiau nei priesmėlingų, o periodais be kritulių dirvožemio drėgmė priesmėlinguose mažėja greičiau.
4. SWAP modeliu sumodeliuoti drėgmės rodikliai gali būti panaudojami ekstremalių sąlygų tyrimams išskiriant sausus ir drėgnus periodus dirvožemyje. Lyginant su dabar Lietuvoje taikomais kriterijais nustatyta, kad pagal sumodeliuotą dirvožemio drėgmę buvo identifikuota 74 % oficialiai paskelbtų stichinių sausrų ir 87 % ilgų lietingų laikotarpių. Dirvožemio drėgmė sausų periodų pradžioje labiausiai siejasi su prieš tai buvusių 20–40 dienų vidutine oro temperatūra ($r = -0,84 - -0,95, p < 0,05$), o drėgnų periodų pradžioje – su prieš tai buvusių 1–5 dienų kritulių suma ($r = 0,53-0,81, p < 0,05$).
5. Tyrimo metu nustatyta, kad daugiau nei 80 % atvejų, kai fiksuotos itin stiprios neigiamos javų ir šakniavaisių metinio derlingumo anomalijos 2000–2020 metais, jos gali būti siejamos su ekstremaliai sausomis ar drėgnomis sąlygomis dirvožemyje. Likusius metus anomalijas galėjo nulemti nepalankios sąlygos prieš tai buvusios žiemos metu.

6. Palydoviniais metodais nustatyta drėgmė gana daug skiriasi nuo matavimų ar modeliavimo SWAP modeliu rezultatų. Nustatyta, kad ryšys tarp SWAP modelio dirvožemio drėgmės ir dviejų palydovinių produktų (SSM ir ESA CCI SM) yra silpnas, nors dažniausiai ir statistiškai reikšmingas. Tačiau atskirais metais koreliacijos koeficiento reikšmės gali siekti 0,7. Kol kas palydoviniai dirvožemio drėgmės produktai nusileidžia patikimumu modeliavimo rezultatams.
7. Vertinant dirvožemio drėgmės sąlygų pokyčius iki XXI amžiaus pabaigos nustatyta, kad dirvožemio drėgmė gali išaugti tais atvejais, kai numatomas kritulių kiekio augimas. Tačiau kylanti oro temperatūra gali sumažinti didėjančio kritulių kiekio poveikį, todėl bendras meteorologinių sąlygų pokyčio poveikis vidutinėms dirvožemio drėgmės reikšmėms nebus labai stiprus. Dėl kylančios oro temperatūros ir kritulių kiekio persiskirstymo sezono viduje visais analizuotais atvejais meteorologinių ir dirvožemio drėgmės sąlygų ekstremalumas augs: didės tiek sausros ir ilgo lietingo laikotarpio, tiek sausų ir drėgnų periodų dirvožemyje dienų skaičius.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

Adegoke, J. O., & Carleton, A. M. (2002). Relations between Soil Moisture and Satellite Vegetation Indices in the U. S. Corn Belt. *American Meteorological Society*, 3(4), 395–405. [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2002\)003<0395:RBSMAS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2002)003<0395:RBSMAS>2.0.CO;2)

A, Y., Wang, G., Hu, P., Lai, X., Xue, B., & Fang, Q. (2022). Root-zone soil moisture estimation based on remote sensing data and deep learning. *Environmental Research*, 212(B), 113278. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113278>

Akhtar, I., & Nazir, N. (2013). Effect of waterlogging and drought stress in plants. *International Journal of Water Resources and Environmental Sciences*, 2(2), 34–40.

Almendra-Martín, L., Martínez-Fernández, J., Piles, M., González-Zamora, A., Benito-Verdugo, P., & Gaona, J. (2022). Analysis of soil moisture trends in Europe using rank-based and empirical decomposition approaches. *Global and Planetary Change*, 215, 103868. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.103868>

Arduini, I., Orlandi, C., Pampana, S., & Masoni, A. (2016). Waterlogging at tillering affects spike and spikelet formation in wheat. *Crop and Pasture Science*, 67(7), 703–711. <https://doi.org/10.1071/CP15417>

von Arx, G., Pannatier, E. G., Thimonier, A., & Rebetez, M. (2013). Microclimate in forests with varying leaf area index and soil moisture: potential implications for seedling establishment in a changing climate. *Journal of Ecology*, 101(5), 1201–1213. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12121>

Barlow, K. M., Christy, B. P., O’Leary, G. J., Riffkin, P. A., & Nuttall, J. G. (2015). Simulating the impact of extreme heat and frost events on wheat crop production: A review. *Field Crops Research*, 171, 109–119. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.11.010>

Bartholomeus, R. P., Witte, J.-P. M., van Bodegom, P. M., van Dam, J. C., & Aerts, R. (2011). Climate change threatens endangered plant species by stronger and interacting water-related stresses. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 116(G4), G04023. <https://doi.org/10.1029/2011JG001693>

Bauer-Marschallinger, B., & Massart, S. (2022). *Copernicus Global Land Operations “Vegetation and Energy”. ”CGLOPS-1” Service Contract N° 941115 - ISP- 2021 (JRC): Quality assessment report update 2021 – Surface soil moisture. Collection 1 km, version 1.0. Issue 11.00.* TU Wien.

Bauer-Marschallinger, B., & Paulik, C. (2018). *Copernicus Global Land Operations "Vegetation and Energy". "CGLOPS-1" Framework Service Contract N° 199494 (JRC): Algorithm theoretical basis document – Surface soil moisture. Collection 1 km, version 1.0. Issue 1.20.* TU Wien.

Bauer-Marschallinger, B., & Paulik, C. (2019). *Copernicus Global Land Operations "Vegetation and Energy". "CGLOPS-1" Framework Service Contract N° 199494 (JRC): Product user manual – Surface soil moisture. Collection 1 km, version 1. Issue II.30.* TU Wien.

Beguéría, D., & Vicente-Serrano, S. M. (2017). *Package 'SPEI', version 1.7.* Prieiga: <https://cran.r-project.org/web/packages/SPEI/SPEI.pdf>

Bogužas, V., Arvasas, J., & Šniauka P. (2013). *Žemdirbystė: vadovėlis.* Akademija: Aleksandro Stulginskio universitetas.

Brocca, L., Ciabatta, L., Massari, C., Camici, S., & Tarpanelli, A. (2017). Soil moisture for hydrological applications: open questions and new opportunities. *Water*, 9(2), 140. <https://doi.org/10.3390/w9020140>

Brocca, L., Massari, C., Ciabatta, L., Wagner, W., & Stoffelen, A. (2016). A. Remote sensing of terrestrial rainfall from Ku-band scatterometers. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(1), 533–539. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2508065>

Brouwer, C., Goffeau, A., & Heibloem, M. (1985). *Irrigation Water Management: Training Manual No. 1 – Introduction to Irrigation.* FAO.

Buitkuvienė, M. S. (1999). Sausros Lietuvoje – klimato kitimo rodiklis? *Mokslas ir gyvenimas*, 10.

Büntgen, U., Urban, O., Krusic, P. J., Rybníček, M., Kolář, T., Kyncl, T., . . . Trnka, M. (2021). Recent European drought extremes beyond Common Era background variability. *Nature Geoscience*. 14, 190–196. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00698-0>

Butkevičienė L. M. (2018). *Ūkininkavimo pradmenys: 2. Augalininkystės pagrindai.* Kaunas: Programos „Leader“ ir žemdirbių mokymo metodikos centras.

Cai, J., Zhang, Y., Li, Y., Liang, X. S., & Jiang, T. (2017). Analyzing the characteristics of soil moisture using GLDAS data: a case study in Eastern China. *Applied Sciences*, 7(6), 566. <https://doi.org/10.3390/app7060566>

Cannell, R. Q., Belford, R. K., Gales, K., Thomson, R. J., & Webster, C. P. (1984). Effects of waterlogging and drought on winter wheat and winter barley grown on a clay and a sandy loam soil. *Plant Soil*, 80, 53–66. <https://doi.org/10.1007/BF02232939>

Caparas, M., Zobel, Z., Castanho, A. D. A., & Schwalm, C. R. (2021). Increasing risks of crop failure and water scarcity in global breadbaskets by

2030. *Environmental Research Letters*, 16(10), 1748–9326, 104013.
<http://doi.org/10.1088/1748-9326/ac22c1>

Carlaw, S. M. (2000). *Soil Moisture Accounting in Distributed Hydrologic Modelling* (baigiamasis magistro darbas, Vaterlo universitetas, Kanada).
Prieiga 2022-08-21 per internetą:
<http://www.civil.uwaterloo.ca/watflood/downloads/carlaw.pdf>

Celik, M. F., Isik, M. S., Yuzugullu, O., Fajraoui, N., & Erten, E. (2022). Soil moisture prediction from remote sensing images coupled with climate, soil texture and topography via deep learning. *Remote Sensing*, 14(21), 5584.
<https://doi.org/10.3390/rs14215584>

Chadha, A., Florentine, S. K., Chauhan, B. S., Long, B., & Jayasundera, M. (2019). Influence of soil moisture regimes on growth, photosynthetic capacity, leaf biochemistry and reproductive capabilities of the invasive agronomic weed; *Lactuca serriola*. *PloS one*, 14(6), e0218191.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0218191>

Chen, C.-F., Son, N.-T., Chang, L.-Y., & Chen, C.-C. (2011). Monitoring of soil moisture variability in relation to rice cropping systems in the Vietnamese Mekong Delta using MODIS data. *Applied Geography*, 31(2), 463–475. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2010.10.002>

Chen, S., Wen, Z., Jiang, H., Zhao, Q., Zhang, X., & Chen, Y. (2015). Temperature vegetation dryness index estimation of soil moisture under different tree species. *Sustainability*, 7(9), 11401–11417.
<https://doi.org/10.3390/su70911401>

Chen, T., de Jeu, R. A. M., Liu, Y. Y., van der Werf, G. R., & Dolman, A. J. (2014). Using satellite based soil moisture to quantify the water driven variability in NDVI: A case study over mainland Australia. *Remote Sensing of Environment*, 140, 330–338. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.022>

Cheng, F. Y., & Chen, Y. (2018). Variations in soil moisture and their impact on land–air interactions during a 6-month drought period in Taiwan. *Geoscience Letters*, 5, 26. <https://doi.org/10.1186/s40562-018-0125-8>

Cholet, C., Houle, D., Sylvain J.-D., Doyon, F., & Maheu, A. (2022). Climate change increases the severity and duration of soil water stress in the temperate forest of Eastern North America. *Frontiers in Forests and Global Change*, 5. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.879382>

Christensen, O. B., Kjellström, E., Dieterich, C., Gröger, M., & Meier, H. E. M. (2022). Atmospheric regional climate projections for the Baltic Sea region until 2100. *Earth System Dynamics*, 13, 133–157.
<https://doi.org/10.5194/esd-13-133-2022>

Cohen, I., Zandalinas, S. I., Huck, C., Fritschi, F. B., & Mittler, R. (2021). Meta-analysis of drought and heat stress combination impact on crop yield

and yield components. *Physiologia Plantarum*, 171(1), 66–76. <https://doi.org/10.1111/ppl.13203>

Copernicus Climate Change Service. (2022). *Climate in 2017 – European wet and dry indicators*. Prieiga 2022-09-04 per internetą: <https://climate.copernicus.eu/climate-2017-european-wet-and-dry-indicators>

Costa, A., Albuquerque, J. A., Costa, A., Pértile, P., & Silva, F. R. (2013). Water retention and availability in soils of the State of Santa Catarina-Brazil: effect of textural classes, soil classes and lithology. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37(6), 1535–1548. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000600010>

van Dam, J. C., & Feddes, R. A. (2000). Numerical simulation of infiltration, evaporation and shallow groundwater levels with the Richards equation. *Journal of Hydrology*, 233(1–4), 72–85. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00227-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00227-4)

Daryanto, D., Wang, L., & Jacinthe, P.-A. (2016). Global synthesis of drought effects on maize and wheat production. *PLoS ONE*, 11(5), e0156362. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0156362>

Daryanto, D., Wang, L., & Jacinthe, P.-A. (2017). Global synthesis of drought effects on cereal, legume, tuber and root crops production: A review. *Agricultural Water Management*, 179, 18–33. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.04.022>

Das, N. N., Mohanty, B. P., Cosh, M. H., & Jackson, T. J. (2008). Modeling and assimilation of root zone soil moisture using remote sensing observations in Walnut Gulch Watershed during SMEX04. *Remote Sensing of Environment*, 112(2), 415–429. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.10.027>

Daukaitė, U. (2013). *Įvairių sausringumo indeksų taikymas ekstremalių sausrų vertinimui Lietuvoje* (baigiamasis bakalauro darbas, Vilniaus universitetas).

Detto, M., Montaldo, N., Albertson, J. D., Mancini, M., & Katul, G. (2006). Soil moisture and vegetation controls on evapotranspiration in a heterogeneous Mediterranean ecosystem on Sardinia, Italy. *Water Resources Research*, 42(8), W08419. <https://doi.org/10.1029/2005WR004693>

Dickman, E. E., Pennington, L. K., Franks, S. J., & Sexton, J. P. (2019). Evidence for adaptive responses to historic drought across a native plant species range. *Evolutionary Applications*, 12(8), 1569–1582. <https://doi.org/10.1111/eva.12803>

Didiano, T. J., Johnson, M. T. J., & Duval, T. P. (2016). Disentangling the effects of precipitation amount and frequency on the performance of 14 grassland species. *PLoS ONE*, 11(9), e0162310. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0162310>

Dyrddal, A. V., Olsson, J., Médus, E., Arnbjerg-Nielsen, K., Post, P., Aņiskeviča, S., . . . Mäkelä, A. (2021). Observed changes in heavy daily precipitation over the Nordic-Baltic region. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 38, 100965. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100965>

Dong, X., Zhou, Y., Chen, H., & Sun, S. (2022). Lag impacts of the anomalous July soil moisture over Southern China on the August rainfall over the Huang–Huai River Basin. *Climate Dynamics*, 58, 1737–1754. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05989-1>

Dorigo, W. A., Wagner, W., Hohensinn, R., Hahn, S., Paulik, C., Xaver, A., . . . Jackson, T. (2011). The International Soil Moisture Network: a data hosting facility for global in situ soil moisture measurements. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5), 1675–1698. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1675-2011>

Dorigo, W., Wagner, W., Albergel, C., Albrecht, F., Balsamo, G., Brocca, L., . . . Lecomte, P. (2017). ESA CCI Soil Moisture for improved Earth system understanding: State-of-the art and future directions. *Remote Sensing of Environment*, 203, 185–215. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.07.001>

Eberhard, J., van Schaik, N. L. M. B., Schibalski, A., & Gräff, T. (2020). Simulating future salinity dynamics in a coastal marshland under different climate scenarios. *Vadose Zone Journal*, 19:e20008. <https://doi.org/10.1002/vzj2.20008>

EEA. (2022). *Projected change in annual (left) and summer (right) precipitation, 2071–2100*. Prieiga 2022-08-21 per internetā: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/projected-changes-in-annual-and-6>

Engstrom, R., Hope, A., Kwon, H., & Stow, D. (2008). The relationship between soil moisture and NDVI near Barrow, Alaska. *Physical Geography*, 29(1), 38–53. <https://doi.org/10.2747/0272-3646.29.1.38>

Erdenebat, E., & Sato, T. (2018). Role of soil moisture-atmosphere feedback during high temperature events in 2002 over Northeast Eurasia. *Progress in Earth and Planetary Science*, 5(37). <https://doi.org/10.1186/s40645-018-0195-4>

European Union. (2017). *Short-term outlook for EU agricultural markets – Autumn 2017*, 19.

European Union. (2018). *Short-term outlook for EU agricultural markets – Spring 2018*, 20.

Farkas, Z., Varga-László, E., Anda, A., Veisz, O., & Varga, B. (2020). Effects of waterlogging, drought and their combination on yield and water-use efficiency of five Hungarian winter wheat varieties. *Water*, 12(5), 1318. <https://doi.org/10.3390/w12051318>

Farrar, T. J., Nicholson, S. E., & Lare, A. R. (1994). The influence of soil type on the relationships between NDVI, rainfall, and soil moisture in semiarid Botswana. II. NDVI response to soil moisture. *Remote Sensing of Environment*, 50(2), 121–133. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90039-6](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90039-6)

France, J., & Thornley, J. H. M. (1984). *Mathematical Models in Agriculture*. Butterworth.

Galaunaitė, A. (2014). *Šiltojo laikotarpio stichiniai meteorologiniai reiškiniai Lietuvoje 1971–2010 metais: šalnos, kaitros, sausros* (baigiamasis bakalauro darbas, Vilniaus universitetas).

Glenn, E. P., Huete, A. R., Nagler, P. L., & Nelson, S. G. (2008). Relationship between remotely-sensed vegetation indices, canopy attributes and plant physiological processes: what vegetation indices can and cannot tell us about the landscape. *Sensors*, 8(4), 2136–2160. <https://doi.org/10.3390/s8042136>

Gruber, A., Scanlon, T., van der Schalie, R., Wagner, W., & Dorigo, W. (2019). Evolution of the ESA CCI Soil Moisture climate data records and their underlying merging methodology. *Earth System Science Data*, 11(2), 717–739. <https://doi.org/10.5194/essd-11-717-2019>

Gumuzzio, A., Brocca, L., Sánchez, N., González-Zamora, A., & Martínez-Fernández, J. (2016). Comparison of SMOS, modelled and *in situ* long-term soil moisture series in the northwest of Spain. *Hydrological Sciences Journal*, 61(14), 2610–2625. <https://doi.org/10.1080/02626667.2016.1151981>

Hanel, M., Rakovec, O., Markonis, Y., Máca, P., Samaniego, L., Kyselý, J., & Kumar, R. (2018). Revisiting the recent European droughts from a long-term perspective. *Scientific Reports*, 8, 9499. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-27464-4>

Hargreaves, G. H. (1994). Defining and using reference evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 120, 1132–1139.

Hari, V., Rakovec, O., Markonis, Y., Hanel, M., & Kumar, R. (2020). Increased future occurrences of the exceptional 2018–2019 Central European drought under global warming. *Scientific Reports*, 10, 12207. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68872-9>

Hatfield, J. L., & Prueger, J. H. (2015). Temperature extremes: Effect on plant growth and development. *Weather and Climate Extremes*, 10(A), 4–10. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.08.001>

Hildreth, W. W. (1981). *Comparison of the characteristics of soil water profile models*. AgRISTARS Rep. SM-LO-00490.

Hirschi, M., Nicolai-Shaw, N., Preimesberger, W., Scanlon, T., Dorigo, W., Rodriguez Fernandez, N., . . . Kidd, R. (2020). *ESA Climate Change Initiative Plus Soil Moisture: Product Validation and Intercomparison Report (PVIR) Supporting Product version v04.7, Deliverable ID: D4.1 Version 1*. Earth Observation Data Centre for Water Resources Monitoring (EODC).

Hogg, E. H., Barr, A. G., & Black, T. A. (2013). A simple soil moisture index for representing multi-year drought impacts on aspen productivity in the western Canadian interior. *Agricultural and Forest Meteorology*, 178–179, 173–182. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.04.025>

Holsten, A., Vetter, T., Vohland, K., & Krysanova, V. (2009). Im-pact of climate change on soil moisture dynamics in Brandenburg with a focus on nature conservation areas. *Ecological Modelling*, 220(17), 2076–2087. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2009.04.038>

Hong, S.-Y., & Pan H.-L. (2000). Impact of soil moisture anomalies on seasonal, summertime circulation over North America in a Regional Climate Model. *Journal of geophysical research*, 105(D24), 29625–29634. <https://doi.org/10.1029/2000JD900276>

Huang, C., Gao, Y., Qin, A., Liu, Z., Zhao, B., Ning, D., . . . Liu, A. (2022). Effects of waterlogging at different stages and durations on maize growth and grain yields. *Agricultural Water Management*, 261, 107334. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107334>

van den Hurk, B., Doblas-Reyes, F., Balsamo, G., Koster, R. D., Seneviratne, S. I., & Camargo Jr, H. (2012). Soil moisture effects on seasonal temperature and precipitation forecast scores in Europe. *Climate Dynamics*, 38, 349–362. <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0956-2>

Immerzeel, W. W., van Heerwaarden, C. C., & Droogers, P. (2009). Modelling climate change in a Dutch polder system using the FutureViewR modelling suite. *Computers & Geosciences*, 35(3), 446–458. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2008.04.010>.

Institute of Soil Science and Plants Cultivation. (2022). ADMS – Agricultural Drought Monitoring System. Prieiga 2022-09-04 per internetą: <https://susza.iung.pulawy.pl/en/mwg/>

IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC.

Yang, Y., Javanroodi, K., & Nik, V. M. (2022). Climate Change and Renewable energy generation in Europe – long-term impact assessment on solar and wind energy using high-resolution future climate data and considering climate uncertainties. *Energies*, 15(1), 302. <https://doi.org/10.3390/en15010302>

Yu, Y., Wei, W., Chen, L. D., Jis, F. Y., Yang, L., Zhang, H. D., & Feng, T. J. (2015). Responses of vertical soil moisture to rainfall pulses and land uses in a typical loess hilly area, China. *Solid Earth*, 6(2), 595–608. <https://doi.org/10.5194/se-6-595-2015>

Yu, L., Gao, W., Shamshiri, R., Tao, S., Ren, Y., Zhang, Y., & Su, G. (2021). Review of research progress on soil moisture sensor technology. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 14, 32–42. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20211404.6404>

Jaagus, J., Aasa, A., Aniskevich, S., Boincean, B., Bojariu, R., Briede, . . . Zahradníček, P. (2021). Long-term changes in drought indices in eastern and central Europe. *International Journal of Climatology*, 42(1), 225–249. <https://doi.org/10.1002/joc.7241>

Jackson, T. J. (1986). Soil Water Modeling and Remote Sensing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-24(1), 37–46. <https://doi.org/10.1109/TGRS.1986.289586>

Jaeger, E. B., & Seneviratne, S. I. (2011). Impact of soil moisture–atmosphere coupling on European climate extremes and trends in a regional climate model. *Climate Dynamics*, 36, 1919–1939. <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0780-8>

Jakimavičiūtė, N. (2008). *Sausrų Lietuvoje indikacija skirtingų kritulių rodiklių pagalba* (baigiamasis bakalauro darbas, Vilniaus universitetas).

Jian, J., Pan, P., Chen, Y., & Yang, W. (2009). Soil moisture retrieval quantitatively with remotely sensed data and its crucial factors analysis. *Journal of Water Resource and Protection*, 1(6), 439–447. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2009.16053>

Jones, L. A., Kimball, J. S., Podest, E., McDonald, K. C., Chan, S. K., & Njoku, E. G. (2009). A method for deriving land surface moisture, vegetation, and open water fraction from AMSR-E. In *Proc. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARRS '09) July 13–17, Cape Town, South Africa*. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2009.5417921>

Jones, R. J. A., Zdruli, P., & Montanarella, L. (2000). The estimation of drought risk in Europe from soil and climatic data. In Vogt, J. V., Somma, F. (Eds.), *Drought and drought mitigation in Europe. Advances in Natural and Technological Hazards Research*, 14, 133–146. Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-015-9472-1_10

Joris, I., & Feyen, J. (2003). Modelling water flow and seasonal soil moisture dynamics in an alluvial groundwater-fed wetland. *Hydrology and Earth System Sciences*, 7(1), 57–66. <https://hess.copernicus.org/articles/7/57/2003/hess-7-57-2003.pdf>

JRC. (2017a). *JRC MARS Bulletin Crop monitoring in Europe October 2017*, 25(10). Luxembourg: Publications Office of the European Union.

JRC. (2017b). *JRC MARS Bulletin Crop monitoring in Europe November 2017*, 25(11). Luxembourg: Publications Office of the European Union.

Karamouz, M., Alipour, R. S., Roothinia, M., & Fereshtehpour, M. (2022). A remote sensing driven soil moisture estimator: Uncertain downscaling with geostatistically based use of ancillary data. *Water Resources Research*, 58, e2022WR031946. <https://doi.org/10.1029/2022WR031946>

Kasim, A. A., Carlson, T. N., & Usman, S. H. (2020). Limitations in validating derived soil water content from thermal/optical measurements using the simplified triangle method. *Remote Sensing*, 12(7), 1155. <https://doi.org/10.3390/rs12071155>

Katavoutas, G., Founda, D., Varotsos, K. V. & Giannakopoulos C. (2022). Climate change impacts on thermal stress in four climatically diverse European cities. *International Journal of Biometeorology*, 66, 2339–2355. <https://doi.org/10.1007/s00484-022-02361-8>

Kaur, K., Mahajan, R., & Deepak, B. (2016). A review of various soil moisture measurement techniques. *International Journal of Innovative research in Science. Engineering and Technology*, 5(4), 5774–5778.

Keshta, N., Elshorbagy, A. & Carey, S. (2012). Impacts of climate change on soil moisture and evapotranspiration in reconstructed watersheds in northern Alberta, Canada. *Hydrological Processes*, 26(9), 1321–1331. <https://doi.org/10.1002/hyp.8215>

Kim, J., Mohanty, B. P., & Shin, Y. (2015). Effective soil moisture estimate and its uncertainty using multimodel simulation based on Bayesian Model Averaging. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(16), 8023–8042. <https://doi.org/10.1002/2014JD022905>

Klimavičius, L. (2022). *Sausrų išplitimo ir intensyvumo vertinimas naudojant palydovinius duomenis* (baigiamasis magistras darbas, Vilniaus universitetas).

Klimavičius, L., Rimkus, E., & Stonevičius, E. (2020). Seasonality and long-term trends of NDVI values in different land use types in the Eastern part of the Baltic Sea basin. *Vilnius University Proceedings*, 10, 42. <https://doi.org/10.15388/Klimatokaita.2020.34>

Koster, R. D., & Walker, G. K. (2015). Interactive vegetation phenology, soil moisture, and monthly temperature forecasts. *Journal of Hydrometeorology*, 16(4), 1456–1465. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0205.1>

Kroes, J. G., van Dam, J. C., Bartholomeus, R. P., Groenendijk, P., Heinen, M., Hendriks, R. F. A., . . . van Walsum, P.E.V. (2017). *SWAP version 4:*

Theory description and user manual. Wageningen Environmental Research, Report 2780.

Krotovas, A. (2012). *Dirvožemio hidroterminis režimas Lietuvoje* (baigiamasis magistro darbas, Vilniaus universitetas).

Kumar, S., Siingh, D., Singh, R. P., & Singh A. K. (2016). The influence of meteorological parameters and atmospheric pollutants on lightning, rainfall, and normalized difference vegetation index in the Indo-Gangetic Plain. *International Journal of Remote Sensing*, 37(1), 53–77. <https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1117680>

Kurnik, B., Kajfež-Bogataj, L. & Horion, S. (2015). An assessment of actual evapotranspiration and soil water deficit in agricultural regions in Europe. *International Journal of Climatology*, 35(9), 2451–2471. <https://doi.org/10.1002/joc.4154>

Lascano, R. J. (1991). Review of models for predicting soil water balance. In *Soil water balance in the Sudano-Sahelian Zone. Proceedings of the Niamey Workshop, February 1991*, 199, 443–458.

Lietuvos agrarinės ekonomikos institutas. (2007). *Lietuvos žemės ir maisto ūkis 2006*. Vilnius. Prieiga 2022-09-04 per internetą: <https://www.ekvi.lt/publikacija/lietuvos-zemes-ir-maisto-ukis-2006>

Lietuvos agrarinės ekonomikos institutas. (2011). *Lietuvos žemės ir maisto ūkis 2010*. Vilnius. Prieiga 2022-09-04 per internetą: <https://www.ekvi.lt/publikacija/lietuvos-zemes-ir-maisto-ukis-2010>

Lietuvos agrarinės ekonomikos institutas. (2012). *Lietuvos žemės ir maisto ūkis 2011*. Vilnius. Prieiga 2022-09-04 per internetą: <https://www.ekvi.lt/publikacija/lietuvos-zemes-ir-maisto-ukis-2011-agriculture-and-food-sector-in-lithuania-2011>

Lietuvos agrarinės ekonomikos institutas. (2015). *Lietuvos žemės ir maisto ūkis 2014*. Vilnius. Prieiga 2022-09-04 per internetą: <https://www.ekvi.lt/publikacija/lietuvos-zemes-ir-maisto-ukis-2014-agriculture-and-food-sector-in-lithuania-2014>

Lietuvos agrarinės ekonomikos institutas. (2018). *Lietuvos žemės ir maisto ūkis 2017*. Vilnius. Prieiga 2022-09-04 per internetą: <https://www.ekvi.lt/publikacija/lietuvos-zemes-ir-maisto-ukis-2017>

Lietuvos agrarinės ekonomikos institutas. (2019). *Lietuvos žemės ir maisto ūkis 2018*. Vilnius. Prieiga 2022-09-04 per internetą: <https://www.ekvi.lt/publikacija/lietuvos-zemes-ir-maisto-ukis-2018>

Lietuvos agrarinės ekonomikos institutas. (2020). *Lietuvos žemės ir maisto ūkis 2019*. Vilnius. Prieiga 2022-09-04 per internetą: <https://www.ekvi.lt/publikacija/lietuvos-zemes-ir-maisto-ukis-2019>

Lietuvos hidrometeorologijos tarnyba. (1998). Agrometeorologinių stebėjimų nuostatai. Vilnius.

Lietuvos hidrometeorologijos tarnyba. (2020). Pavojingų meteorologinių reiškinių rodikliai (2020-11-25 Nr. V-80). Prieiga 2022-07-09 per internetą: http://www.meteo.lt/php/SGRIPS2/prog_failai/sgrrips/PR-rodikliai.pdf

Lietuvos Respublikos Vyriausybė. (2000). Nutarimas „Dėl Ekstremalių įvykių kriterijų patvirtinimo“ (2000-02-24 Nr. 216). *Valstybės žinios*, 18-439.

Lietuvos Respublikos Vyriausybė. (2006). Nutarimas „Dėl Ekstremalių įvykių kriterijų sąrašo patvirtinimo“ (2006-03-09 Nr. 241). *Valstybės žinios*, 29-1004.

Lietuvos Respublikos aplinkos ministerija. (2020). Ministro įsakymas „Dėl Lietuvos Respublikos aplinkos ministro 2011 m. lapkričio 11 d. įsakymo Nr. D1-870 „Dėl Stichinių, katastrofinių meteorologinių ir hidrologinių reiškinių rodiklių patvirtinimo“ pakeitimo“ (2020-06-09 Nr. D1-344). TAR, 2020-06-09, Nr. 12598.

Lietuvos Respublikos žemės ūkio ministerija. (2018). *2017 metų veiklos ataskaita*. 8D-108 (16.12). Vilnius.

Lietuvos statistikos departamentas. (2020). *Lietuvos aplinka, žemės ūkis ir energetika*. Prieiga 2022-09-04 per internetą: <https://osp.stat.gov.lt/lietuvos-aplinka-zeme-ukis-ir-energetika-2020/zemes-ukis/augalininkyste>

Liu, Y. Y., Dorigo, W. A., Parinussa, R. M., de Jeu, R. A. M., Wagner, W., McCabe, M. F., . . . van Dijk, A. I. J. M. (2012). Trend-preserving blending of passive and active microwave soil moisture retrievals. *Remote Sensing of Environment*, 123, 280–297. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.03.014>

Liu, Y. Y., Parinussa, R. M., Dorigo, W. A., de Jeu, R. A. M., Wagner, W., van Dijk, A. I. J. M., . . . Evans, J. P. (2011). Developing an improved soil moisture dataset by blending passive and active microwave satellite-based retrievals. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(2), 425–436. <https://doi.org/10.5194/hess-15-425-2011>

Liu, Y., & Yang, Y. (2022). Advances in the quality of global soil moisture products: a review. *Remote Sensing*, 14(15), 3741. <https://doi.org/10.3390/rs14153741>

Liu, J., Rahmani, F., Lawson, K., & Shen, C. (2022). A multiscale deep learning model for soil moisture integrating satellite and in situ data. *Geophysical Research Letters*, 49(7), e2021GL096847. <https://doi.org/10.1029/2021GL096847>

Liu, K., Harrison, M. T., Yan, H., Liu, D. L., Meinke, H., Hoogenboom, G., . . . Zhou, M. (2023). Silver lining to a climate crisis in multiple prospects for alleviating crop waterlogging under future climates. *Nature Communications*, 14, 765. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36129-4>

Liu, L., Guo, Z., Huang, G., & Wang, R. (2019). Water productivity evaluation under Multi-GCM Projections of climate change in oases of the Heihe River basin, Northwest China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(10), 1706. <https://doi.org/10.3390/ijerph16101706>

Ma, Y., Feng, S., Huo, Z., & Song, X. (2011). Application of the SWAP model to simulate the field water cycle under deficit irrigation in Beijing, China. *Mathematical and Computer Modelling*, 54(3–4), 1044–1052. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2010.11.034>

Mačiulytė, V. (2017). *Augalų vegetacijos būklė rytinėje Baltijos regiono dalyje* (baigiamasis magistro darbas, Vilniaus universitetas).

Mačiulytė, V., Rimkus, E., Valiukas, D., & Stonevičius, E. (2022). Long-term precipitation events in the eastern part of the Baltic Sea region. *Oceanologia*, 65(1), 141–150. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2022.02.003>

Mäkinen, H., Kaseva, J., Trnka, M., Balek, J., Kersebaum, K. C., Nendel, C., . . . Kahiluoto, H. (2018). Sensitivity of European wheat to extreme weather. *Field Crops Research*, 222, 209–217. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.11.008>

Malik, A. I., Colmer, T. D., Lambers, H., Setter, T. L. & Schortemeyer, M. (2002). Short-term waterlogging has long-term effects on the growth and physiology of wheat. *New Phytologist*, 153(2), 225–236. <https://doi.org/10.1046/j.0028-646X.2001.00318.x>

Marchin, R. M., Ossola, A., Leishman, M. R. & Ellsworth, D. S. (2020). A simple method for simulating drought effects on plants. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1715. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01715>

Markonis, Y., Kumar, R., Hanel, M., Rakovec, O., Máca, P., & Aghakouchak, A. (2021). The rise of compound warm-season droughts in Europe. *Science Advances*, 7(6). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abb9668>

Martínez-de la Torre, A., & Miguez-Macho, G. (2019). Groundwater influence on soil moisture memory and land–atmosphere fluxes in the Iberian Peninsula. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(12), 4909–4932. <https://doi.org/10.5194/hess-23-4909-2019>

Martinez-Ferri, E., Muriel-Fernández, J. L., & Rodríguez Díaz, J. A. (2013). Soil water balance modelling using SWAP: an application for irrigation water management and climate change adaptation in citrus. *Outlook on agriculture*, 42(2), 93–102. <https://doi.org/10.5367/oa.2013.0125>

Méndez-Barroso, L. A., Vivoni, E. R., Watts, C. K., & Rodríguez, J. C. (2009). Seasonal and interannual relations between precipitation, surface soil moisture and vegetation dynamics in the North American monsoon region.

Journal of Hydrology, 377(1–2), 59–70.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.009>

Meng, L., & Quiring, S. M. (2008). A Comparison of Soil Moisture Models Using Soil Climate Analysis Network Observations. *Journal of Hydrometeorology*, 9(4), 641–659. <https://doi.org/10.1175/2008JHM916.1>

Mimeau, L., Trambly, Y., Brocca, L., Massari, C., Camici, S., & Finaud-Guyot, P. (2021). Modeling the response of soil moisture to climate variability in the Mediterranean region. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(2), 653–669. <https://doi.org/10.5194/hess-25-653-2021>

Moragoda, N., Kumar, M., & Cohen, S. (2022). Representing the role of soil moisture on erosion resistance in sediment models: Challenges and opportunities. *Earth-Science Reviews*, 229, 104032. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104032>

Moravec, V., Markonis, Y., Rakovec, O., Svoboda, M., Trnka, M., Kumar, R., & Hanel, M. (2021). Europe under multi-year droughts: how severe was the 2014–2018 drought period? *Environmental Research Letters*, 16(3), 034062. <http://doi.org/10.1088/1748-9326/abe828>

Mukula, J., & Rantanen, O. (1987). Climatic risks to the yield and quality of field crops in Finland I. Basic facts about Finnish field crops production. *Annals of Agriculturae Fennica*, 26, 1–18.

Nacionalinė mokėjimo agentūra. (2018). *Stichinio meteorologinio reiškinių „Ilgas lietingas laikotarpis“ nustatymas*. Galutinė ataskaita. Vilnius: Vilniaus universitetas.

Nacionalinė mokėjimo agentūra. (2019). *Tinkamiausias Lietuvai stichinio meteorologinio reiškinių – sausros nustatymo metodikos parengimas*. Galutinė ataskaita. Vilnius: Vilniaus universitetas.

Narasimhan, B., Srinivasan, R., Arnold, J. G., & di Luzio, M. (2005). Estimation of long-term soil moisture using a distributed parameter hydrological model and verification using remotely sensed data. *American Society of Agricultural Engineers*, 48(3), 1101–1113.

Narendra, B. H. (2008). *Drought monitoring using rainfall data and spatial soil moisture modeling* (baigiamasis magistro darbas, Gadjah Mados universitetas).

Navickas, J. (2008). *Agrofizika ir agrometeorologija. Metodiniai patarimai*. Kaunas: Lietuvos žemės ūkio universitetas.

Olsson, J., Dyrddal, A. V., Médus, E., Södling, J., Aņiskeviča, S., Arnbjerg-Nielsen, K., . . . Wern, L. (2022). Sub-daily rainfall extremes in the Nordic–Baltic region. *Hydrology Research*, 53(6), 807–824. <https://doi.org/10.2166/nh.2022.119>

Orth, R., Zscheischler, J., & Seneviratne, S. I. (2016). Record dry summer in 2015 challenges precipitation projections in Central Europe. *Scientific Reports*, 6, 28334. <http://doi.org/10.1038/srep28334>

Owe, M., de Jeu, R., & Walker, J. (2001). A methodology for surface soil moisture and vegetation optical depth retrieval using the microwave polarization difference index. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(8), 1643–1654. <https://doi.org/10.1109/36.942542>

Pan, J., Sharif, R., Xu, X. & Chen, X. (2021). Mechanisms of waterlogging tolerance in plants: research progress and prospects. *Frontiers in Plant Science*, 11, 627331. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.627331>

Peek, R., Irving, K., Yarnell, S. M., Lusardi, R., Stein, E. D. & Mazor, R. (2021). Identifying functional flow linkages between stream alteration and biological stream condition indices across California. *Frontiers in Environmental Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.790667>

Peltonen-Sainio, P., Jauhiainen, L. & Laurila, I. P. (2009). Cereal yield trends in northern European conditions: changes in yield potential and its realisation. *Field Crops Research*, 110(1), 85–90. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.07.007>

Peng, J., Albergel, C., Balenzano, A., Brocca, L., Cartus, O., Cosh, M. H., . . . Loew, A. (2021). A roadmap for high-resolution satellite soil moisture applications – confronting product characteristics with user requirements. *Remote Sensing of Environment*, 252, 112162. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112162>

Pereira, P., & Novara, A. (2014). Spatial distribution of soil water repellency in a grassland located in Lithuania. *Geophysical Research Abstracts*, 16, EGU2014–15085.

Pierre, C., Bergametti, C., Marticorena, B., Mougín, E., Bouet, E., & Schmechtig, C. (2012). Impact of vegetation and soil moisture seasonal dynamics on dust emissions over the Sahel. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D6), D06114. <https://doi.org/10.1029/2011JD016950>

Pileckaitė, G. (2012). *Dirvožemio organinės anglies tyrimai sistemoje: dirvožemis ir augalams* (baigiamasis magistro darbas, Vilniaus Gedimino technikos universitetas).

Piles, M., Sánchez, N., Vall-llossera, M., Camps, A., Martínez-Fernández, J., Martínez, J., & Verónica González-Gambau, V. (2014). A downscaling approach for SMOS land observations: evaluation of high-resolution soil moisture maps over the Iberian Peninsula. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(9), 3845–3857. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2325398>

Piniewski, M., Marcinkowski, P., O’Keeffe, J., Szcześniak, M., Nieróbca, A., Kozyra, J., . . . Okruszko, T. (2020). Model-based reconstruction and projections of soil moisture anomalies and crop losses in Poland. *Theoretical and Applied Climatology*, 140, 691–708. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03106-6>

Piniewski, M., Mezghani, A., Szcześniak, M., & Kundzewicz, Z. W. (2017). Regional projections of temperature and precipitation changes: Robustness and uncertainty aspects. *Meteorologische Zeitschrift*, 2(26), 223–234. <https://doi.org/10.1127/metz/2017/0813>

Pinke, Z., Decsi, B., Kardos, M. K., Kern, Z., Kozma, Z., Pásztor, L., & Ács, T. (2022). Changing patterns of soil water content and relationship with national wheat and maize production in Europe. *European Journal of Agronomy*, 140, 126579. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126579>

Pinnington, E., Quaife, T., & Black, E. (2018). Impact of remotely sensed soil moisture and precipitation on soil moisture prediction in a data assimilation system with the JULES land surface model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(4), 2575–2588. <https://doi.org/10.5194/hess-22-2575-2018>

Pińskwar, I., Choryński, A., & Kundzewicz, Z. W. (2020). Severe drought in the spring of 2020 in Poland – more of the same? *Agronomy*, 10(11), 1646. <https://doi.org/10.3390/agronomy10111646>

Pirttioja, N., Carter, T. R., Fronzek, S., Bindi, M., Hoffmann, H., Palosuo, T., . . . Rötter, R. P. (2015). Temperature and precipitation effects on wheat yield across a European transect: A crop model ensemble analysis using impact response surfaces. *Climate Research*, 65, 87–105. <https://doi.org/10.3354/cr01322>

Ploschuk, R. A., Miralles, D. J., Colmer, T. D., Ploschuk, E. L., & Striker, G. G. (2018). Waterlogging of winter crops at early and late stages: impacts on leaf physiology, growth and yield. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1863. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01863>

Porter, J. R., Xie, L., Challinor, A. J., Cochrane, K., Howden, S. M., Iqbal, M. M., . . . Travasso, M. I. (2014). Food security and food production systems. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA, 485–533.

Povilaitis, V., Lazauskas, S., & Kriščiukaitienė, I. (2009). Javų derlingumo prognozavimas pagal tikėtinus klimato kaitos scenarijus. *Žemės ūkio mokslai*, 16(3–4), 224–229.

Powell, J. P., & Reinhard, S. (2016). Measuring the effects of extreme weather events on yields. *Weather and Climate Extremes*, 12, 69–79. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2016.02.003>

Pradhan, P., Seydewitz, T., Zhou, B., Lüdeke, M. K. B., & Kropp, J. P. (2022). Climate extremes are becoming more frequent, co-occurring, and persistent in Europe. *Anthropocene Science*, 1, 264–277. <https://doi.org/10.1007/s44177-022-00022-4>

Preimesberger, W., Scanlon, T., Su, C.-H., Gruber, A., & Dorigo, W. (2021). Homogenization of structural breaks in the global ESA CCI Soil Moisture Multisatellite climate data record. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 59(4), 2845–2862. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2020.3012896>

Qin, T., Feng, J., Zhang, X., Li, C., Fan, J., Zhang, C., . . . Yan, D. (2023). Continued decline of global soil moisture content, with obvious soil stratification and regional difference. *Science of The Total Environment*, 864, 160982. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160982>

Ramonas, D. (2015). *Dirvožemio drėgmės analizė Lietuvoje* (baigiamasis bakalauro darbas, Vilniaus universitetas).

Ranatunga, K., Nation, E. R., & Barratt, D. G. (2008). Review of soil water models and their applications in Australia. *Environmental Modelling & Software*, 23(9), 1182–1206. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2008.02.003>

Rasheed, M. W., Tang, J., Sarwar, A., Shah, S., Saddique, N., Khan, M. U., . . . Sultan, M. (2022). Soil moisture measuring techniques and factors affecting the moisture dynamics: a comprehensive review. *Sustainability*, 14(18), 11538. <https://doi.org/10.3390/su141811538>

Rauschkolb, R., Henres, L., Lou, C., Godefroid, S., Dixon, L., Durka, W., . . . Scheepens, J. F. (2022). Historical comparisons show evolutionary changes in drought responses in European plant species after two decades of climate change. *Basic and Applied Ecology*, 58, 26–38. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2021.11.003>

Řehoř, J., Brázdil, R., Trnka, M., Lhotka, O., Balek, J., Možný, M., . . . Turňa, M. (2021). Soil drought and circulation types in a longitudinal transect over central Europe. *International Journal of Climatology*, 41(S1), E2834–E2850. <https://doi.org/10.1002/joc.6883>

Reintam, E., Vennik, K., Kukk, L., Kade, S., Krebstein, K., Are, M., & Astover, A. (2016). Measuring and predicting soil moisture conditions for trafficability. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil & Plant Science*, 66(8), 698–705. <https://doi.org/10.1080/09064710.2016.1210210>

Rimkus, E., Maciulyte, V., Stonevicius, E., & Valiukas, D. (2020). A revised agricultural drought index in Lithuania. *Agricultural and Food Science*, 29(4), 359–371. <https://doi.org/10.23986/afsci.92150>

Rimkus, E., Stonevicius, E., Kilpys, J., Maciulyte, V., & Valiukas, D. (2017). Drought identification in the eastern Baltic region using NDVI. *Earth System Dynamics*, 8(3), 627–637. <https://doi.org/10.5194/esd-8-627-2017>

Rimkus, E., Stonevicius, E., Korneev, V., Kazys, J., Valiuškevičius, G., & Pakhomau, A. (2013). Dynamics of meteorological and hydrological droughts in the Neman river basin. *Environmental Research Letters*, 8, 5014. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/4/045014>

Rojek, E., Lukowski, M., Marczewski, W., & Usowicz, B. (2014). Soil moisture on Polish territory – comparison of satellite and ground-based measurements. *Geophysical Research Abstracts*, 16, EGU2014-758-1.

Roux, P. C., Aalto, J., & Luoto, M. (2013). Soil moisture's underestimated role in climate change impact modelling in low-energy systems. *Global Change Biology*, 19(10), 2965–2975. <https://doi.org/10.1111/gcb.12286>

Ruostenoja, K., Markkanen, T., Venäläinen, A., Räisänen, P., Peltola, H. (2018). Seasonal soil moisture and drought occurrence in Europe in CMIP5 projections for the 21st century. *Climate Dynamics*, 50, 1177–1192. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3671-4>

Sakalauskas, A., Šarauskis, E., Šniauka, P., Vaiciukevičius, E., & Zinkevičius, R. (2012). *Augalininkystės technologijų inžinerija: mokomoji knyga*. Akademija: Aleksandro Stulginskio universitetas.

Sawicka, B., Barbaś, P., Pszczółkowski, P., Skiba, D., Yeganehpoor, F., & Krochmal-Marczak, B. (2022). Climate changes in Southeastern Poland and food Security. *Climate*, 10(4), 57. <https://doi.org/10.3390/cli10040057>

Scanlon, T., Pasik, A., Dorigo, W., de Jeu, R. A. M., Hahn, S., van der Schalie, R., . . . Preimesberger, W. (2021). *ESA Climate Change Initiative Plus Soil Moisture: Algorithm Theoretical Baseline Document (ATBD) Supporting Product Version 06.1. D2.1 Version 2*. Earth Observation Data Centre for Water Resources Monitoring (EODC).

van der Schalie, R., Preimesberger, W., Pasik, A., Scanlon, T., & Kidd, D. (2021). *ESA Climate Change Initiative Plus Soil Moisture: Product User Guide (PUG) Supporting Product Version v06.1. Deliverable ID: D4.2 Version 2*. Earth Observation Data Centre for Water Resources Monitoring (EODC).

Schmitt, J., Offermann, F., Söder, M., Frühauf, C., & Finger, R. (2022). Extreme weather events cause significant crop yield losses at the farm level in German agriculture. *Food Policy*, 112, 102359. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2022.102359>

Schnur, M. T., Xie, H., & Wang, X. (2010). Estimating root zone soil moisture at distant sites using MODIS NDVI and EVI in a semi-arid region of southwestern USA. *Ecological Informatics*, 5(5), 400–409. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2010.05.001>

Semenova, I. (2021). Spatiotemporal distribution of soil moisture content over Ukraine and its relationship to atmospheric conditions. *Environmental Sciences Proceedings*, 4(1), 20. <https://doi.org/10.3390/ecas2020-08117>

Skulovich, O., & Gentine, P. (2023). A long-term consistent artificial intelligence and remote sensing-based soil moisture dataset. *Scientific Data*, 10, 154. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02053-x>

Snowdon, R. J., Wittkop, B., Chen, T.-W., & Stahl, A. (2021). Crop adaptation to climate change as a consequence of long-term breeding. *Theoretical and Applied Genetics*, 134, 1613–1623. <https://doi.org/10.1007/s00122-020-03729-3>

Soane, B. D., Campbell, D. J. & Herkes, S. M. (1972). The characterization of some scottish arable topsoils by agricultural and engineering methods. *Journal of Soil Science*, 23(1), 93–104. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1972.tb01645.x>

Somorowska, U. (2017). Soil water storage in Poland over the years 2000–2015 in response to precipitation variability as retrieved from GLDAS Noah simulations. *Geographia Polonica*, 90(1), 53–64. <https://doi.org/10.7163/GPol.0078>

Spinoni, J., Naumann, G., & Vogt, J. V. (2017). Pan-European seasonal trends and recent changes of drought frequency and severity. *Global and Planetary Change*, 148, 113–30. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.11.013>

Stevenson, S., Coats, S., Touma, D., Cole, J., Lehner, F., Fasullo, J., & Otto-Bliesner, B. (2022). Twenty-first century hydroclimate: A continually changing baseline, with more frequent extremes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(12), e2108124119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2108124119>

Stonevičius, E., Rimkus, E., Kažys, J., Bukantis, A., Kriauciūnienė, J., Akstinas, V., . . . Pliūraitė, V. (2018). Recent aridity trends and future projections in the Nemunas River basin. *Climate Research*, 75(2), 143–154. <https://doi.org/10.3354/cr01514>

Stonevičius, E., Štaras, A., & Valiuškevičius, G. (2008). Dirvožemio drėgmės režimo pokyčių XXI a. prognozės pagal skirtingus klimato kaitos scenarijus. *Geografija*, 44(1), 17–25.

Stratonovitch, P., & Semenov, M. A. (2015). Heat tolerance around flowering in wheat identified as a key trait for increased yield potential in

Europe under climate change. *Journal of Experimental Botany*, 66(12), 3599–3609. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv070>

Stravinskas, T. (2008). *Drėkinimo sistemų poreikis Kauno apskrityje*. (baigiamasis magistro darbas, Lietuvos Žemės ūkio universitetas).

Sungmin, O., & Orth, R. (2021). Global soil moisture data derived through machine learning trained with *in-situ* measurements. *Scientific Data*, 8, 170. <https://doi.org/10.1038/s41597-021-00964-1>

Supit, I., van Diepen, C. A., de Wit, A. J. W., Wolf, J., Kabat, P., Baruth, B., & Ludwig, F. (2012). Assessing climate change effects on European crop yields using the Crop Growth Monitoring System and a weather generator. *Agricultural and Forest Meteorology*, 164, 96–111. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.05.005>

Tack, J., Barkley, A., & Nalley, L. L. (2015). Effect of warming temperatures on US wheat yields. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(22), 6931–6936. <https://doi.org/10.1073/pnas.1415181112>

Tammets, T., & Jaagus, J. (2013). Climatology of precipitation extremes in Estonia using the method of moving precipitation totals. *Theoretical and Applied Climatology*, 111, 623–639. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0691-1>

Taparuskienė, L. (2005). *Braškių vandens poreikio tyrimai Lietuvos Vidurio zonoje* (daktaro disertacija, Lietuvos žemės ūkio universitetas).

Taparuskienė, L., & Heng, L. (2008). Adaptation of SWAP model for simulation of soil moisture dynamic in strawberry field. In *7th International Conference on Environmental Engineering ICEE 2008 – Conference Proceedings*, 736–742.

Taparuskienė, L., Adamonytė, I., Burbulis, N., Jonavičienė, R., Kinčius, L., Lukševičiūtė, V., . . . Seibutis, V. (2013). *Žemės ūkio sausros įvertinimo kriterijų pagrindimas ir metodikos lietuviškos klimatinėmis sąlygomis parengimas*. Akademija: Aleksandro Stulginskio universitetas.

Tian, L.-X., Zhang, Y.-C., Chen, P.-L., Zhang, F.-F., Li, J., Yan, F., . . . Feng, B. (2021). How does the waterlogging regime affect crop yield? A global meta-analysis. *Frontiers in Plant Science*, 12, 634898. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.634898>

Trnka, M., Feng, S., Semenov, M. A., Olesen, J. E., Kersebaum, K. C., Rötter, R. P., . . . Büntgen, U. (2019). Mitigation efforts will not fully alleviate the increase in water scarcity occurrence probability in wheat-producing areas. *American Association for the Advancement of Science*, 5(9). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aau2406>

Trnka, M., Rötter, R. P., Ruiz-Ramos, M., Kersebaum, K., Olesen, J., Zalud, Z., & Semenov, M. A. (2014). Adverse weather conditions for

European wheat production will become more frequent with climate change. *Nature Climate Change*, 4, 637–643. <https://doi.org/10.1038/NCLIMATE2242>

Uber, M., Vandervaere, J.-P., Zin, I., Braud, I., Heistermann, M., Legout, C., . . . Nord, G. (2018). How does initial soil moisture influence the hydrological response? A case study from southern France. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(12), 6127–6146. <https://doi.org/10.5194/hess-22-6127-2018>

Usowicz, B., Lipiec, J., & Lukowski, M. (2019). Evaluation of Soil Moisture Variability in Poland from SMOS Satellite Observations. *Remote Sensing*, 11(11), 1280. <https://doi.org/10.3390/rs11111280>

Valiukas, D. (2015). *Sausrų ir sausų laikotarpių Lietuvoje analizė* (daktaro disertacija, Vilniaus universitetas).

Valstybės žemės fondas. (2018). *Atnaujinti žemės našumo vertinimo erdviniai duomenys*. Prieiga 2022-08-21 per internetą: <https://www.vzf.lt/?naujienos=atnaujinti-zemes-nasumo-vertinimo-erdviniai-duomenys>

Venterea, R. T., Rolston, D. E., & Cardon, Z. G. (2005). Effects of soil moisture, physical, and chemical characteristics on abiotic nitric oxide production. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 72, 27–40. <https://doi.org/10.1007/s10705-004-7351-5>

Visser, A., Kroes, J., van Vliet, M. T. H., Blenkinsop, S., Fowler, H. J., & Broers, H. P. (2012). Climate change impacts on the leaching of a heavy metal contamination in a small lowland catchment. *Journal of Contaminant Hydrology*, 127(1–4), 47–64. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2011.04.007>

Vyriausioji hidrometeorologinės tarnybos valdyba. (1957). *Hidrometeorologinių stočių ir postų nuostatai. 11 laida: agrometeorologiniai stebėjimai stotyse ir postuose. I dalis: pagrindiniai agrometeorologiniai stebėjimai*. Vilnius: Hidrometeorologinė leidykla.

Volungevičius, J., & Kavaliauskas, P. (2012). *Lietuvos dirvožemiai (žemėlapiu aprašas): mokomoji priemonė*. Vilnius: Vilniaus universitetas.

Vrublevskytė, U. (2013). *Sausringumo sąlygų vertinimas HTK indeksu Lietuvoje* (baigiamasis bakalauro darbas, Vilniaus universitetas).

Wagner, W., Dorigo, W., de Jeu, R., Fernandez, D., Benveniste, J., Haas, E., & Ertl, M. (2012). Fusion of active and passive microwave observations to create an Essential Climate Variable data record for soil moisture. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, I-7, 315–321. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-I-7-315-2012>

Walker, J. P. (1999). *Estimating Soil Moisture Profile Dynamics from Near-Surface Soil Moisture Measurements and Standard Meteorological Data* (daktaro disertacija, Niukaslo universitetas, Australija).

Wanders, N., Karssenbergh, D., Bierkens, M., Parinussa, R., de Jeu, R., van Dam, J., & de Jong, S. (2012). Observation uncertainty of satellite soil moisture products determined with physically-based modelling. *Remote Sensing of Environment*, 127, 341–356. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.09.004>

Wang, C., Qi, J., Moran, S., & Marsett, R. (2004). Soil moisture estimation in a semiarid rangeland using ERS-2 and TM imagery. *Remote Sensing of Environment*. 90(2), 178–189. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.12.001>

Wang, X., Cai, H., Li, L., & Wang, X. (2020). Estimating soil water content and evapotranspiration of winter wheat under deficit irrigation based on SWAP model. *Sustainability*, 12(22), 9451. <https://doi.org/10.3390/su12229451>

Wang, X., Gao, R., & Yang, X. (2021). Responses of soil moisture to climate variability and livestock grazing in a semiarid Eurasian steppe. *Science of the Total Environment*, 781. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146705>

Wang, X., Xie, H. Y., Guan, H., & Zhou, X. (2007). Different responses of MODIS-derived NDVI to root-zone soil moisture in semi-arid and humid regions. *Journal of Hydrology*, 340(1–2), 12–24. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.03.022>

Wanti, S. R. (2012). *Application of SWAP model to analyse the impact of drought and climate change on water demand and apple fruit crop yield in the Kromme Rijn area, The Netherlands* (baigiamasis magistro darbas, Utrechto universitetas).

Wen, J., Jackson, T. J., Bindlish, R., Hsu, A. Y., & Su, Z. B. (2005). Retrieval of soil moisture and vegetation water content using SSM/I data over a corn and soybean region. *Journal of Hydrometeorology*, 6(6), 854–863. <https://doi.org/10.1175/JHM462.1>

Wicki, A., Jansson, P.-E., Lehmann, P., Hauck, C., & Stähli, M. (2021). Simulated or measured soil moisture: which one is adding more value to regional landslide early warning? *Hydrology and Earth System Sciences*, 25, 4585–4610. <https://doi.org/10.5194/hess-25-4585-2021>

Wiecheteck, L. H., Giarola, N. F. B., de Lima, R. P., Tormena, C. A., Torres, L. C., & de Paula, A. L. (2020). Comparing the classical permanent wilting point concept of soil (–15,000 hPa) to biological wilting of wheat and barley plants under contrasting soil textures. *Agricultural Water Management*, 230, 105965. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105965>

WMO. (2010). *Implementation plan for the global observing system for climate in support of the UNFCCC (2010 update)*. GCOS Rep. 138.

WMO. (2012). *International glossary of hydrology*. WMO-No. 385.

WMO. (2022). *Essential Climate Variables*. Prieiga 2022-09-05 per internetą: <https://public.wmo.int/en/programmes/global-climate-observing-system/essential-climate-variables>

Wösten, J. H. M., de Vries, F., Hoogland, T., Massop, T. H. L., Veldhuizen, A. A., Vroon, H. R. J., . . . Bolman, A. (2013). *BOFEK2012, de nieuwe, bodemfysische schematisatie van Nederland* (olandiškai). Alterra-rapport 2387. Wageningen. Prieiga 2022-09-21 per internetą: <https://edepot.wur.nl/247678>

Zare, M., Azam, S., & Sauchyn, D. (2022). Impact of climate change on soil water content in Southern Saskatchewan, Canada. *Water*, 14(12), 1920. <https://doi.org/10.3390/w14121920>

Zeder, J., & Fischer, E. M. (2020). Observed extreme precipitation trends and scaling in Central Europe. *Weather and Climate Extremes*, 29, 100266, <https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100266>

Zehe, E., & Sivapalan, M. (2009). Threshold behaviour in hydrological systems as (human) geo-ecosystems: manifestations, controls, implications. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13, 1273–1297. <https://doi.org/10.5194/hess-13-1273-2009>

Zhang, Y., Liu, J., Xu, X., Tian, Y., Li, Y., & Gao, Q. (2010). The response of soil moisture content to rainfall events in semi-arid area of Inner Mongolia. *Procedia Environmental Sciences*, 2, 1970–1978. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2010.10.211>

Zhao, Y., Mao, X., Shukla, M. K., & Li, S. (2020). Modeling soil water–heat dynamic changes in seed-maize fields under film mulching and deficit irrigation conditions. *Water*, 12(5), 1330. <https://doi.org/10.3390/w12051330>

Zribi, M., Anguela, T. P., Duchemin, B., Lili, Z., Wagner W., Hasenauer, S., & Chehbouni, A. (2010). Relationship between soil moisture and vegetation in the Kairouan plain region of Tunisia using low spatial resolution satellite data. *Water Resources Research*, 46(6), W06508. <https://doi.org/10.1029/2009WR008196>

Žebrauskas, Ž. (2013). *Dirvos drėgmės anomalijų Lietuvoje vertinimas remiantis palydoviniais duomenimis* (baigiamasis bakalauro darbas, Vilniaus universitetas).

Žukauskaitė, L. (1999). *Augalų vegetacijos laikotarpio agroklimatinių sąlygų anomalijos Lietuvoje 1925–1997 metais* (baigiamasis magistro darbas, Vilniaus universitetas).

Žurinskas, D. (2019). *Sutvirtinto šlaito modeliavimas ir grunto stiprumo parametrų tyrimas* (baigiamasis magistro projektas, Kauno technologijos universitetas).

Žuvininkaitė, R. (2013). *SPI sausringumo indekso dinamika Lietuvoje* (baigiamasis bakalauro darbas, Vilniaus universitetas).

PRIEDAI

1 priedas. Antro laipsnio polinominės funkcijos kreivės, aprašančios, kaip dirvožemio drėgmę pakeičia iškritę gausūs krituliai priklausomai nuo prieš juos buvusios dirvožemio drėgmės (pagal (2) lygtį), koeficientai. Lygtys sudarytos pagal 1951–2020 metų gegužės–spalio mėnesių duomenis keturiais kritulių kiekio intervalais.

| Stotis | Koeficientas | Per dieną iškritusių kritulių kiekio intervalas | | | |
|-----------|--------------|---|----------|----------|---------|
| | | 10–20 mm | 20–30 mm | 30–40 mm | ≥ 40 mm |
| Dotnuva | a | -5,804 | -3,868 | 24,808 | 82,304 |
| | b | 0,730 | 1,186 | 0,667 | -0,900 |
| | c | -0,007 | -0,013 | -0,011 | -0,001 |
| Kaunas | a | 0,877 | 1,708 | 13,581 | 61,074 |
| | b | 0,514 | 0,975 | 1,004 | -0,244 |
| | c | -0,006 | -0,011 | -0,014 | -0,006 |
| Raseiniai | a | -0,964 | 0,215 | 8,232 | 35,103 |
| | b | 0,581 | 1,056 | 1,169 | 0,672 |
| | c | -0,006 | -0,012 | -0,015 | -0,013 |
| Lazdijai | a | 9,954 | 18,136 | 28,892 | 35,206 |
| | b | 0,201 | 0,405 | 0,381 | 0,650 |
| | c | -0,005 | -0,009 | -0,010 | -0,014 |
| Utena | a | 7,883 | 17,025 | 23,240 | 50,583 |
| | b | 0,339 | 0,468 | 0,726 | -0,017 |
| | c | -0,007 | -0,010 | -0,015 | -0,008 |
| Varėna | a | 7,913 | 18,572 | 28,866 | 50,806 |
| | b | 0,336 | 0,324 | 0,400 | -0,148 |
| | c | -0,007 | -0,008 | -0,011 | -0,006 |

2 priedas. Tiesinės lygties, aprašančios, kaip periodas be kritulių paveikia dirvožemio drėgmę priklausomai nuo prieš šį periodą buvusios dirvožemio drėgmės, koeficientai. Lygtys sudarytos devyniais dirvožemio drėgmės prieš nelietingą periodą intervalais. Regresijos tiesės koeficientai apskaičiuoti pagal 1951–2020 metų gegužės–rugsėjo mėnesių duomenis.

| Drėgmė | Dotnuva | | Kaunas | | Raseiniai | | Lazdijai | | Utena | | Varėna | |
|----------|---------|-------|--------|-------|-----------|-------|----------|-------|--------|-------|--------|-------|
| | z | a | z | a | z | a | z | a | z | a | z | a |
| 0–10 mm | - | - | - | - | - | - | -0,29 | -0,02 | -0,09 | -0,10 | -0,44 | -0,01 |
| 10–20 mm | - | - | - | - | - | - | -1,24 | -0,60 | -1,49 | -0,26 | -1,59 | -0,44 |
| 20–30 mm | -0,13 | -0,20 | -0,41 | -0,21 | -0,47 | -0,21 | -2,29 | -1,04 | -1,33 | -1,16 | -1,67 | -1,10 |
| 30–40 mm | -0,91 | -0,35 | -1,34 | -0,54 | -0,87 | -0,80 | -1,05 | -1,54 | -0,82 | -1,43 | -0,93 | -1,61 |
| 40–50 mm | -0,59 | -0,92 | -1,53 | -1,05 | -1,28 | -1,14 | -1,99 | -1,51 | -1,52 | -1,30 | -1,83 | -1,57 |
| 50–60 mm | -0,96 | -1,13 | -1,14 | -1,38 | -1,46 | -1,29 | -2,63 | -1,77 | -4,30 | -1,17 | -3,20 | -1,62 |
| 60–70 mm | -1,52 | -1,21 | -1,99 | -1,29 | -1,45 | -1,38 | -8,41 | -0,90 | -8,19 | -1,42 | -9,03 | -1,28 |
| 70–80 mm | -3,37 | -1,26 | -2,98 | -1,41 | -2,29 | -1,37 | -13,60 | -1,94 | -10,19 | -2,71 | -10,85 | -4,47 |
| 80–90 mm | -3,72 | -2,03 | -6,86 | -1,33 | -4,76 | -1,65 | -14,85 | -4,41 | -14,00 | -6,10 | -13,43 | -4,35 |

3 priedas. Drėgmės pokyčio mediana priklausamai nuo prieš laikotarpį be kritulių buvusio drėgmes kiekio (intervalais eilutėse) ir laikotarpio trukmės, kai kritulių nebuvo 3–10 dienų (stulpeliuose) 1951–2020 metų gegužės–rugsėjo mėnesiais. Brūkšnelis rodo, kad analizuojamu laikotarpiu tokių atvejų fiksuota nebuvo.

| Priemolingi dirvožemiai | | | | | | | | | | |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---|---|
| Dotnuva | | | | | | | | | | |
| Drėgmė \ P | 3 d. | 4 d. | 5 d. | 6 d. | 7 d. | 8 d. | 9 d. | 10 d. | | |
| 0-10 mm | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 10-20 mm | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 20-30 mm | -0,6 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 30-40 mm | -2,0 | -2,3 | -2,7 | -3,0 | -3,2 | -3,3 | -3,3 | -3,6 | - | - |
| 40-50 mm | -3,6 | -4,7 | -5,6 | -6,5 | -7,2 | -7,1 | -7,6 | -11,0 | - | - |
| 50-60 mm | -4,5 | -5,8 | -6,8 | -7,8 | -8,5 | -9,9 | -11,3 | -12,3 | - | - |
| 60-70 mm | -5,2 | -6,8 | -8,0 | -8,8 | -10,1 | -10,6 | -11,7 | -15,2 | - | - |
| 70-80 mm | -7,2 | -8,8 | -10,2 | -11,8 | -12,7 | -13,1 | -14,4 | -15,4 | - | - |
| 80-90 mm | -10,7 | -12,7 | -14,8 | -15,7 | -16,9 | -18,2 | -19,4 | -28,4 | - | - |
| Kaunas | | | | | | | | | | |
| Drėgmė \ P | 3 d. | 4 d. | 5 d. | 6 d. | 7 d. | 8 d. | 9 d. | 10 d. | | |
| 0-10 mm | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 10-20 mm | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 20-30 mm | -1,3 | -1,5 | -1,5 | -1,9 | -1,8 | -1,8 | -2,4 | -2,5 | - | - |
| 30-40 mm | -3,0 | -3,9 | -4,2 | -4,4 | -4,7 | -5,8 | -5,8 | -5,8 | - | - |
| 40-50 mm | -4,7 | -6,2 | -7,4 | -8,4 | -9,7 | -10,1 | -11,1 | -11,1 | - | - |
| 50-60 mm | -4,9 | -6,3 | -7,7 | -9,2 | -10,6 | -11,6 | -12,6 | -14,0 | - | - |
| 60-70 mm | -5,5 | -7,3 | -8,6 | -9,6 | -10,9 | -12,2 | -13,1 | -13,5 | - | - |
| 70-80 mm | -7,1 | -8,5 | -9,9 | -11,4 | -12,8 | -12,8 | -15,3 | -16,7 | - | - |
| 80-90 mm | -10,8 | -11,9 | -14,0 | -15,2 | -16,5 | -16,3 | -15,6 | -16,2 | - | - |
| Raseiniai | | | | | | | | | | |
| Drėgmė \ P | 3 d. | 4 d. | 5 d. | 6 d. | 7 d. | 8 d. | 9 d. | 10 d. | | |
| 0-10 mm | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 10-20 mm | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 20-30 mm | -1,3 | -1,6 | -1,5 | -1,2 | -1,3 | -1,4 | -2,3 | -3,4 | - | - |
| 30-40 mm | -3,5 | -4,4 | -5,5 | -6,0 | -6,8 | -7,7 | -8,3 | -9,0 | - | - |
| 40-50 mm | -4,7 | -6,1 | -7,4 | -8,6 | -9,5 | -10,5 | -10,8 | -11,4 | - | - |
| 50-60 mm | -5,2 | -6,6 | -8,1 | -9,6 | -11,0 | -11,1 | -12,1 | -13,0 | - | - |
| 60-70 mm | -5,1 | -6,2 | -7,6 | -8,6 | -10,1 | -11,1 | -12,0 | -12,0 | - | - |
| 70-80 mm | -6,3 | -8,0 | -9,8 | -11,1 | -11,4 | -14,1 | -14,4 | -17,2 | - | - |
| 80-90 mm | -9,2 | -11,5 | -14,2 | -15,4 | -16,9 | -14,6 | -17,0 | -19,9 | - | - |
| Utena | | | | | | | | | | |
| Drėgmė \ P | 3 d. | 4 d. | 5 d. | 6 d. | 7 d. | 8 d. | 9 d. | 10 d. | | |
| 0-10 mm | -0,4 | -0,5 | -0,4 | -0,8 | -0,9 | -0,9 | -0,9 | -1,0 | - | - |
| 10-20 mm | -2,6 | -2,9 | -3,2 | -3,0 | -3,1 | -3,4 | -3,6 | -3,9 | - | - |
| 20-30 mm | -5,0 | -6,1 | -7,1 | -8,1 | -9,1 | -9,8 | -11,4 | -11,9 | - | - |
| 30-40 mm | -5,0 | -6,7 | -8,1 | -9,5 | -10,7 | -12,0 | -14,3 | -14,5 | - | - |
| 40-50 mm | -5,3 | -6,6 | -7,8 | -9,8 | -10,9 | -12,2 | -13,3 | -14,5 | - | - |
| 50-60 mm | -8,1 | -10,1 | -11,4 | -12,3 | -12,4 | -14,0 | -12,7 | -13,5 | - | - |
| 60-70 mm | -11,8 | -13,7 | -14,5 | -15,8 | -17,0 | -17,8 | -18,6 | -18,7 | - | - |
| 70-80 mm | -19,3 | -21,8 | -23,8 | -25,5 | - | - | - | - | - | - |
| 80-90 mm | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Varėna | | | | | | | | | | |
| Drėgmė \ P | 3 d. | 4 d. | 5 d. | 6 d. | 7 d. | 8 d. | 9 d. | 10 d. | | |
| 0-10 mm | -0,7 | -0,5 | -0,6 | -0,3 | -0,5 | -0,6 | -0,6 | -0,5 | - | - |
| 10-20 mm | -3,1 | -3,8 | -4,4 | -4,9 | -4,5 | -4,8 | -5,7 | -6,1 | - | - |
| 20-30 mm | -5,2 | -6,7 | -8,0 | -9,3 | -10,0 | -10,7 | -11,5 | -11,9 | - | - |
| 30-40 mm | -5,9 | -7,6 | -9,5 | -11,1 | -11,3 | -13,2 | -16,8 | -17,1 | - | - |
| 40-50 mm | -6,7 | -8,0 | -9,7 | -11,2 | -12,2 | -14,0 | -15,1 | -16,2 | - | - |
| 50-60 mm | -8,3 | -10,2 | -11,8 | -13,1 | -14,3 | -16,4 | -18,2 | -19,7 | - | - |
| 60-70 mm | -13,7 | -16,3 | -16,8 | -16,6 | -14,9 | -15,8 | -17,7 | -21,2 | - | - |
| 70-80 mm | -25,3 | -28,0 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 80-90 mm | -26,2 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

4 priedas. Koeficientai z , a , b (pagal (3) lygtį) daugianarės regresijos tiesės, kuri sudaryta numatant galimą dirvožemio drėgmės reikšmę pagal mėnesio kritulių ir oro temperatūros reikšmes priemolinguose ir priesmėlinguose dirvožemiuose gegužės–spalio mėnesiais.

| Dirvožemiai | Mėnuo | Daugianarės regresijos koeficientai | | |
|--------------|-------|-------------------------------------|-------|--------|
| | | z | a | b |
| Priemolingi | 5 | 68,335 | 0,142 | -1,007 |
| | 6 | 67,545 | 0,183 | -1,593 |
| | 7 | 65,481 | 0,192 | -1,608 |
| | 8 | 75,077 | 0,207 | -2,203 |
| | 9 | 66,687 | 0,256 | -1,786 |
| | 10 | 56,198 | 0,153 | 0,449 |
| Priesmėlingi | 5 | 46,184 | 0,145 | -1,056 |
| | 6 | 53,437 | 0,172 | -2,101 |
| | 7 | 35,819 | 0,188 | -1,200 |
| | 8 | 55,379 | 0,203 | -2,397 |
| | 9 | 40,792 | 0,204 | -1,395 |
| | 10 | 32,695 | 0,166 | 0,381 |

5 priedas. Pirsono tiesinės koreliacijos koeficientas tarp dirvožemio drėgmės pirmą sauso periodo dirvožemyje dieną pagal 10-tą procentilį ir kasdinių TPI indeksų (TPI_{d10} , TPI_{d20} , TPI_{d30} , TPI_{15} , TPI_{30}) reikšmių, prieš tai buvusio kritulių kiekio ir vidutinės oro temperatūros už iki 60 dienų laikotarpius 1951–2020 metų gegužės–spalio mėnesiais. Statistiškai reikšmingi koreliacijos koeficientai ($p < 0,05$) paryškinti.

| Rod. \ laikot. | Dotnuva | Kaunas | Raseiniai | Lazdijai | Utena | Varėna | |
|--------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| TPI_{d10} | 0,29 | 0,14 | 0,11 | 0,42 | 0,35 | 0,29 | |
| TPI_{d20} | 0,27 | 0,03 | 0,07 | 0,29 | 0,14 | 0,12 | |
| TPI_{d30} | 0,09 | 0,16 | 0,04 | 0,26 | 0,31 | 0,22 | |
| TPI_{15} | 0,17 | 0,15 | 0,04 | 0,07 | 0,48 | 0,20 | |
| TPI_{30} | -0,12 | 0,18 | 0,10 | 0,12 | 0,27 | 0,12 | |
| Kritulių suma | 1 d. | 0,20 | 0,18 | 0,01 | 0,11 | 0,19 | 0,09 |
| | 3 d. | 0,01 | 0,03 | -0,01 | 0,32 | 0,29 | 0,12 |
| | 5 d. | -0,02 | 0,12 | -0,11 | 0,15 | 0,19 | 0,18 |
| | 10 d. | -0,15 | -0,14 | -0,17 | 0,05 | 0,08 | 0,10 |
| | 20 d. | -0,26 | -0,35 | -0,33 | -0,20 | -0,33 | -0,27 |
| | 30 d. | -0,57 | -0,32 | -0,41 | -0,34 | -0,34 | -0,27 |
| | 40 d. | -0,52 | -0,39 | -0,48 | -0,36 | -0,30 | -0,36 |
| | 50 d. | -0,61 | -0,40 | -0,43 | -0,31 | -0,33 | -0,49 |
| 60 d. | -0,59 | -0,44 | -0,43 | -0,28 | -0,30 | -0,52 | |
| Vidutinė oro temperatūra | 1 d. | -0,83 | -0,70 | -0,75 | -0,74 | -0,72 | -0,67 |
| | 3 d. | -0,86 | -0,69 | -0,70 | -0,79 | -0,72 | -0,70 |
| | 5 d. | -0,87 | -0,70 | -0,69 | -0,82 | -0,72 | -0,71 |
| | 10 d. | -0,89 | -0,76 | -0,75 | -0,85 | -0,76 | -0,76 |
| | 20 d. | -0,94 | -0,84 | -0,87 | -0,87 | -0,87 | -0,87 |
| | 30 d. | -0,94 | -0,89 | -0,91 | -0,87 | -0,91 | -0,90 |
| | 40 d. | -0,91 | -0,92 | -0,91 | -0,83 | -0,89 | -0,88 |
| | 50 d. | -0,86 | -0,88 | -0,89 | -0,75 | -0,85 | -0,84 |
| 60 d. | -0,79 | -0,83 | -0,84 | -0,64 | -0,81 | -0,79 | |

6 priedas. Pirsono tiesinės koreliacijos koeficientas tarp dirvožemio drėgmės pirmą sauso periodo dirvožemyje dieną pagal 5-tą procentilį ir kasdienių TPI indeksų (TPI_{d10}, TPI_{d20}, TPI_{d30}, TPI₁₅, TPI₃₀) reikšmių, prieš tai buvusio kritulių kiekio ir vidutinės oro temperatūros už iki 60 dienų laikotarpius 1951–2020 metų gegužės–spalio mėnesiais. Statistiškai reikšmingi koreliacijos koeficientai ($p < 0,05$) paryškinti.

| Rod. \ laikot. | Dotnuva | Kaunas | Raseiniai | Lazdijai | Utena | Varėna | |
|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| TPI_{d10} | 0,07 | -0,15 | 0,13 | 0,42 | 0,09 | -0,13 | |
| TPI_{d20} | 0,29 | -0,09 | -0,03 | -0,07 | 0,03 | -0,21 | |
| TPI_{d30} | 0,28 | -0,07 | -0,20 | 0,03 | 0,21 | -0,08 | |
| TPI₁₅ | 0,23 | 0,04 | -0,04 | -0,13 | 0,34 | 0,01 | |
| TPI₃₀ | -0,05 | 0,15 | -0,10 | -0,05 | 0,34 | 0,04 | |
| Kritulių suma | 1 d. | -0,01 | 0,28 | 0,19 | 0,16 | -0,03 | -0,02 |
| | 3 d. | -0,07 | -0,15 | -0,01 | 0,05 | -0,12 | 0,09 |
| | 5 d. | -0,07 | -0,15 | -0,06 | 0,03 | -0,09 | -0,10 |
| | 10 d. | -0,23 | -0,27 | -0,09 | 0,04 | -0,21 | -0,22 |
| | 20 d. | -0,16 | -0,39 | -0,28 | -0,38 | -0,27 | -0,46 |
| | 30 d. | -0,33 | -0,44 | -0,49 | -0,36 | -0,25 | -0,46 |
| | 40 d. | -0,47 | -0,38 | -0,53 | -0,44 | -0,29 | -0,41 |
| | 50 d. | -0,55 | -0,48 | -0,53 | -0,41 | -0,39 | -0,39 |
| Vidutinė oro temperatūra | 1 d. | -0,79 | -0,49 | -0,65 | -0,81 | -0,56 | -0,58 |
| | 3 d. | -0,76 | -0,49 | -0,62 | -0,81 | -0,60 | -0,63 |
| | 5 d. | -0,77 | -0,55 | -0,64 | -0,80 | -0,59 | -0,65 |
| | 10 d. | -0,81 | -0,70 | -0,75 | -0,85 | -0,67 | -0,69 |
| | 20 d. | -0,92 | -0,85 | -0,87 | -0,87 | -0,85 | -0,84 |
| | 30 d. | -0,94 | -0,90 | -0,91 | -0,88 | -0,93 | -0,88 |
| | 40 d. | -0,92 | -0,95 | -0,94 | -0,86 | -0,95 | -0,90 |
| | 50 d. | -0,87 | -0,96 | -0,94 | -0,80 | -0,92 | -0,86 |
| 60 d. | -0,80 | -0,94 | -0,92 | -0,70 | -0,88 | -0,80 | |

7 priedas. Pirsono tiesinės koreliacijos koeficientas tarp dirvožemio drėgmės pirmą drėgno periodo dirvožemyje dieną pagal 90-tą procentilį ir kasdienių TPI indeksų (TPI_{d10}, TPI_{d20}, TPI_{d30}, TPI₁₅, TPI₃₀) reikšmių bei prieš tai buvusio kritulių kiekio ir vidutinės oro temperatūros už 1–60 dienų laikotarpius 1951–2020 metų gegužės–spalio mėnesiais. Statistiškai reikšmingi koreliacijos koeficientai ($p < 0,05$) paryškinti.

| Rod. \ laikot. | Dotnuva | Kaunas | Raseiniai | Lazdijai | Utena | Varėna | |
|---------------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| TPI_{d10} | 0,36 | 0,30 | 0,28 | 0,20 | 0,36 | 0,28 | |
| TPI_{d20} | 0,35 | 0,37 | 0,37 | 0,19 | 0,31 | 0,29 | |
| TPI_{d30} | 0,22 | 0,26 | 0,14 | 0,35 | 0,12 | 0,33 | |
| TPI₁₅ | -0,11 | 0,05 | 0,00 | 0,06 | 0,02 | 0,08 | |
| TPI₃₀ | 0,05 | 0,26 | 0,18 | 0,14 | 0,40 | 0,27 | |
| Kritulių suma | 1 d. | 0,51 | 0,65 | 0,72 | 0,84 | 0,85 | 0,83 |
| | 3 d. | 0,66 | 0,70 | 0,67 | 0,76 | 0,78 | 0,85 |
| | 5 d. | 0,63 | 0,62 | 0,55 | 0,58 | 0,63 | 0,59 |
| | 10 d. | 0,17 | 0,26 | 0,16 | 0,13 | 0,13 | 0,18 |
| | 20 d. | 0,26 | 0,38 | 0,39 | 0,14 | 0,19 | 0,21 |
| | 30 d. | 0,28 | 0,39 | 0,36 | 0,32 | 0,25 | 0,25 |
| | 40 d. | 0,37 | 0,43 | 0,34 | 0,34 | 0,38 | 0,38 |
| | 50 d. | 0,32 | 0,44 | 0,35 | 0,42 | 0,31 | 0,37 |
| Vidutinė oro temperatūra | 1 d. | -0,20 | 0,00 | -0,21 | -0,10 | -0,44 | -0,23 |
| | 3 d. | -0,24 | -0,10 | -0,15 | 0,00 | -0,32 | -0,27 |
| | 5 d. | -0,21 | -0,08 | -0,13 | 0,04 | -0,29 | -0,23 |
| | 10 d. | -0,14 | 0,06 | -0,05 | 0,02 | -0,21 | -0,21 |
| | 20 d. | -0,06 | 0,12 | 0,04 | 0,03 | -0,16 | -0,11 |
| | 30 d. | 0,03 | 0,18 | 0,08 | 0,05 | -0,10 | -0,13 |
| | 40 d. | 0,13 | 0,24 | 0,13 | 0,07 | -0,04 | -0,10 |
| | 50 d. | 0,19 | 0,27 | 0,18 | 0,10 | 0,02 | -0,07 |
| 60 d. | 0,26 | 0,29 | 0,20 | 0,13 | 0,05 | -0,05 | |

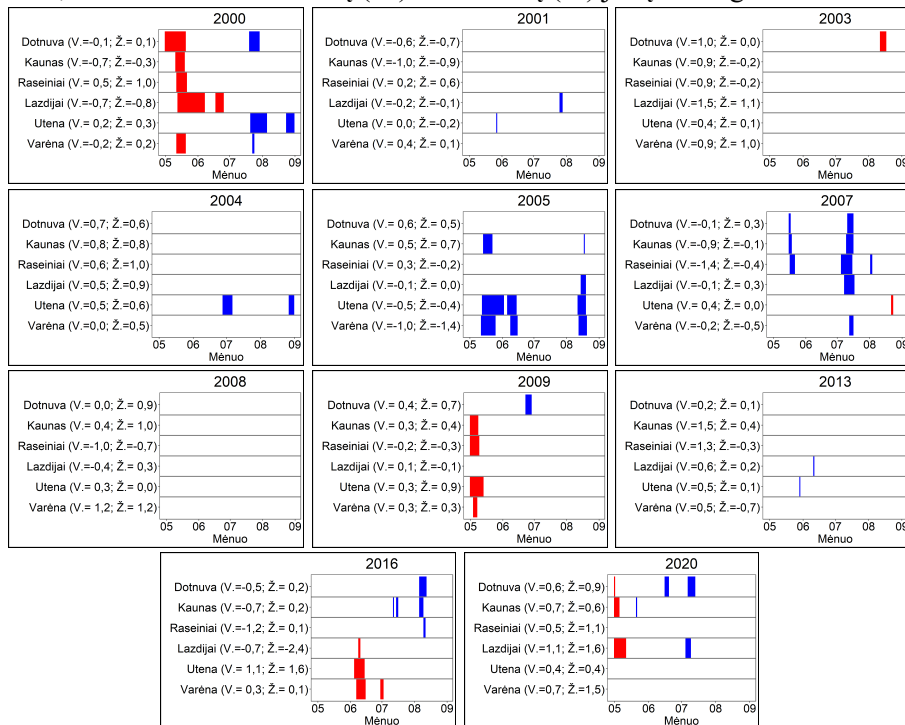
8 priedas. Pirsono tiesinės koreliacijos koeficientas tarp dirvožemio drėgmės pirmą drėgno periodo dirvožemyje dieną pagal 95-tą procentilį ir kasdinių TPI indeksų (TPI_{d10}, TPI_{d20}, TPI_{d30}, TPI15, TPI30) reikšmių, prieš tai buvusio kritulių kiekio ir vidutinės oro temperatūros už iki 60 dienų laikotarpius 1951–2020 metų gegužės–spalio mėnesiais. Statistiškai reikšmingi koreliacijos koeficientai ($p < 0,05$) paryškinti.

| Rod. \ laikot. | Dotnuva | Kaunas | Raseiniai | Lazdijai | Utena | Varėna | |
|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|
| TPI_{d10} | 0,37 | 0,29 | 0,38 | 0,27 | 0,39 | 0,25 | |
| TPI_{d20} | 0,43 | 0,22 | 0,33 | 0,30 | 0,43 | 0,34 | |
| TPI_{d30} | 0,29 | 0,22 | 0,19 | 0,40 | 0,21 | 0,39 | |
| TPI15 | -0,10 | 0,00 | 0,02 | 0,10 | 0,05 | 0,08 | |
| TPI30 | 0,15 | 0,34 | 0,17 | 0,25 | 0,19 | 0,09 | |
| Kritulių suma | 1 d. | 0,59 | 0,67 | 0,64 | 0,81 | 0,81 | 0,79 |
| | 3 d. | 0,68 | 0,69 | 0,67 | 0,77 | 0,79 | 0,72 |
| | 5 d. | 0,70 | 0,60 | 0,54 | 0,53 | 0,64 | 0,59 |
| | 10 d. | 0,19 | 0,17 | 0,21 | 0,25 | 0,35 | 0,16 |
| | 20 d. | 0,29 | 0,14 | 0,26 | 0,28 | 0,39 | 0,15 |
| | 30 d. | 0,33 | 0,29 | 0,24 | 0,34 | 0,34 | 0,13 |
| | 40 d. | 0,29 | 0,37 | 0,32 | 0,38 | 0,40 | 0,11 |
| | 50 d. | 0,27 | 0,37 | 0,28 | 0,41 | 0,39 | 0,10 |
| 60 d. | 0,34 | 0,41 | 0,28 | 0,39 | 0,38 | 0,04 | |
| Vidutinė oro temperatūra | 1 d. | -0,31 | -0,21 | -0,20 | 0,03 | -0,23 | -0,29 |
| | 3 d. | -0,24 | -0,11 | -0,19 | 0,09 | -0,15 | -0,22 |
| | 5 d. | -0,24 | -0,12 | -0,20 | 0,09 | -0,13 | -0,18 |
| | 10 d. | -0,20 | -0,09 | -0,15 | 0,08 | -0,11 | -0,19 |
| | 20 d. | -0,13 | -0,03 | -0,07 | 0,04 | -0,10 | -0,24 |
| | 30 d. | -0,03 | 0,07 | 0,01 | 0,05 | -0,04 | -0,26 |
| | 40 d. | 0,03 | 0,13 | 0,07 | 0,08 | 0,00 | -0,23 |
| | 50 d. | 0,09 | 0,17 | 0,11 | 0,11 | 0,04 | -0,20 |
| 60 d. | 0,13 | 0,21 | 0,15 | 0,13 | 0,07 | -0,17 | |

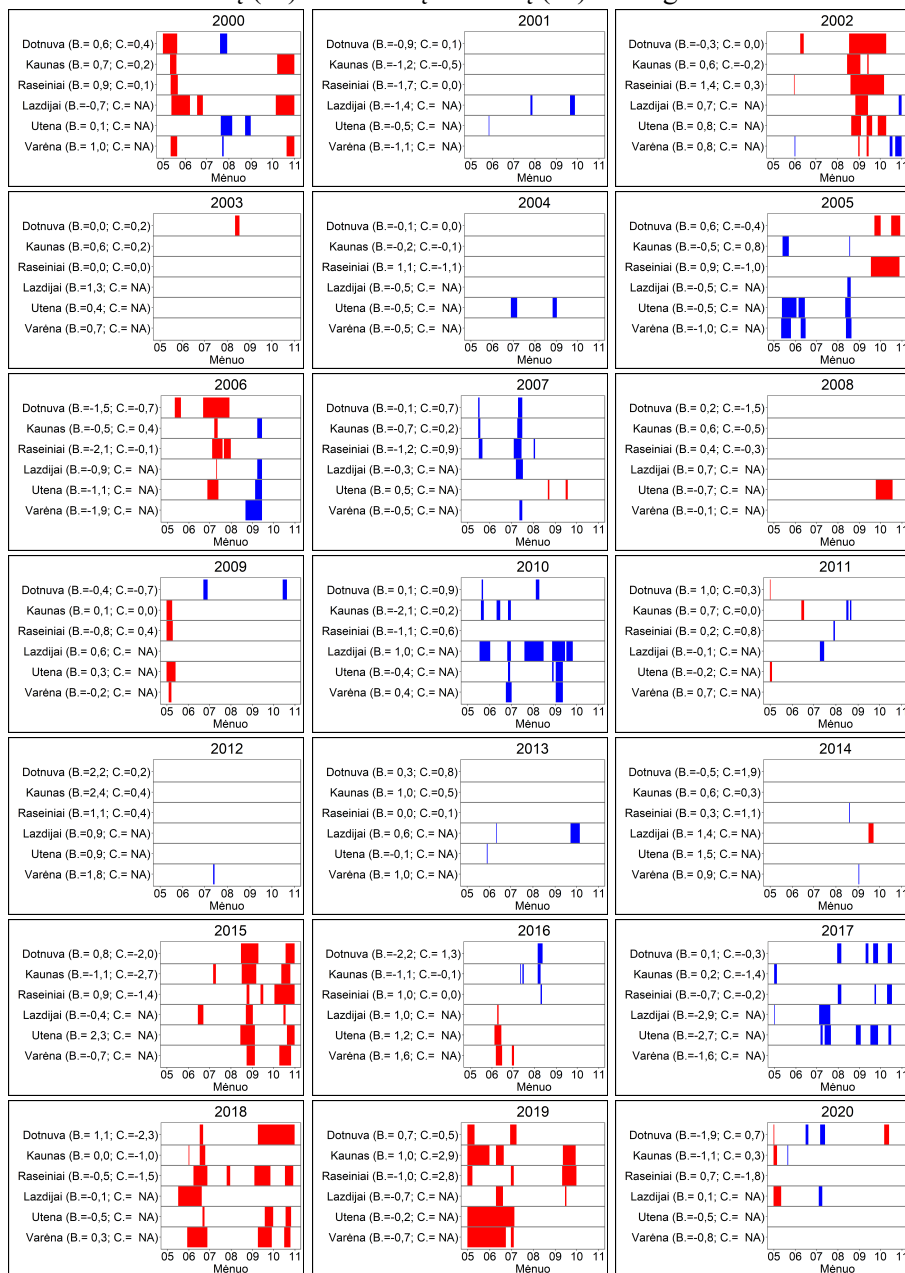
9 priedas. Standartizuotos cukrinių runkelių (C.), bulvių (B.) derlingumo reikšmės skirtingose rajono savivaldybėse. Raudonai pažymėtos neigiamos anomalijos (≤ -1), žaliai – teigiamos anomalijos ($\geq +1$) reikšmės. Brūkšnelis rodo, kad duomenų nėra.

| Sav. / Tipas | Lietuvos Respublika | | Kėdainių r. sav. | | Kauno r. sav. | | Raseinių r. sav. | | Lazdijų r. sav. | | Utenos r. sav. | | Varėnos r. sav. | |
|-----------------|------------------------|------|---------------------|------|------------------|------|---------------------|------|--------------------|------|-------------------|------|--------------------|------|
| | C. | B. | C. | B. | C. | B. | C. | B. | C. | B. | C. | B. | C. | B. |
| 2000 | 0,3 | 1,7 | 0,4 | 0,6 | 0,2 | 0,7 | 0,1 | 0,9 | - | -0,7 | - | 0,1 | - | 1,0 |
| 2001 | 0,1 | -1,1 | 0,1 | -0,9 | -0,5 | -1,2 | 0,0 | -1,7 | - | -1,4 | - | -0,5 | - | -1,1 |
| 2002 | 0,5 | 1,1 | 0,0 | -0,3 | -0,2 | 0,6 | 0,3 | 1,4 | - | 0,7 | - | 0,8 | - | 0,8 |
| 2003 | 0,6 | 1,0 | 0,2 | 0,0 | 0,2 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | - | 1,3 | - | 0,4 | - | 0,7 |
| 2004 | 0,3 | -0,2 | 0,0 | -0,1 | -0,1 | -0,2 | -1,1 | 1,1 | - | -0,5 | - | -0,5 | - | -0,5 |
| 2005 | -0,5 | -0,6 | -0,4 | 0,6 | 0,8 | -0,5 | -1,0 | 0,9 | - | -0,5 | - | -0,5 | - | -1,0 |
| 2006 | -0,8 | -2,5 | -0,7 | -1,5 | 0,4 | -0,5 | -0,1 | -2,1 | - | -0,9 | - | -1,1 | - | -1,9 |
| 2007 | 1,2 | -1,3 | 0,7 | -0,1 | 0,2 | -0,7 | 0,9 | -1,2 | - | -0,3 | - | 0,5 | - | -0,5 |
| 2008 | -1,7 | 0,3 | -1,5 | 0,2 | -0,5 | 0,6 | -0,3 | 0,4 | - | 0,7 | - | -0,7 | - | -0,1 |
| 2009 | -0,4 | 0,0 | -0,7 | -0,4 | 0,0 | 0,1 | 0,4 | -0,8 | - | 0,6 | - | 0,3 | - | -0,2 |
| 2010 | -0,6 | -0,6 | 0,9 | 0,1 | 0,2 | -2,1 | 0,6 | -1,1 | - | 1,0 | - | -0,4 | - | 0,4 |
| 2011 | -0,1 | 0,4 | 0,3 | 1,0 | 0,0 | 0,7 | 0,8 | 0,2 | - | -0,1 | - | -0,2 | - | 0,7 |
| 2012 | 0,2 | 1,0 | 0,2 | 2,2 | 0,4 | 2,4 | 0,4 | 1,1 | - | 0,9 | - | 0,9 | - | 1,8 |
| 2013 | 0,4 | 0,0 | 0,8 | 0,3 | 0,5 | 1,0 | 0,1 | 0,0 | - | 0,6 | - | -0,1 | - | 1,0 |
| 2014 | 1,3 | 0,9 | 1,9 | -0,5 | 0,3 | 0,6 | 1,1 | 0,3 | - | 1,4 | - | 1,5 | - | 0,9 |
| 2015 | -1,8 | 0,7 | -2,0 | 0,8 | -2,7 | -1,1 | -1,4 | 0,9 | - | -0,4 | - | 2,3 | - | -0,7 |
| 2016 | 0,9 | 0,2 | 1,3 | -2,2 | -0,1 | -1,1 | 0,0 | 1,0 | - | 1,0 | - | 1,2 | - | 1,6 |
| 2017 | -1,3 | -1,5 | -0,3 | 0,1 | -1,4 | 0,2 | -0,2 | -0,7 | - | -2,9 | - | -2,7 | - | -1,6 |
| 2018 | -1,4 | -0,2 | -2,3 | 1,1 | -1,0 | 0,0 | -1,5 | -0,5 | - | -0,1 | - | -0,5 | - | 0,3 |
| 2019 | 2,1 | 0,9 | 0,5 | 0,7 | 2,9 | 1,0 | 2,8 | -1,0 | - | -0,7 | - | -0,2 | - | -0,7 |
| 2020 | 0,7 | -0,2 | 0,7 | -1,9 | 0,3 | -1,1 | -1,8 | 0,7 | - | 0,1 | - | -0,5 | - | -0,8 |

10 priedas. Sausi periodai dirvožemyje pagal 5-tą procentilį (raudonai) ir drėgni periodai dirvožemyje pagal 95 procentilį (mėlynai) stotyse metais, kai standartizuota vasarinių ir žieminių javų derlingumo reikšmė (pagal 3.17 lentelę) nepasižymėjo nei neigiama, nei teigiama anomalija daugelyje savivaldybių. Šalia stoties pavadinimo pažymėta savivaldybės, kurioje yra stotis, standartizuota vasarinių (V.) ir žieminių (Ž.) javų derlingumo reikšmė.



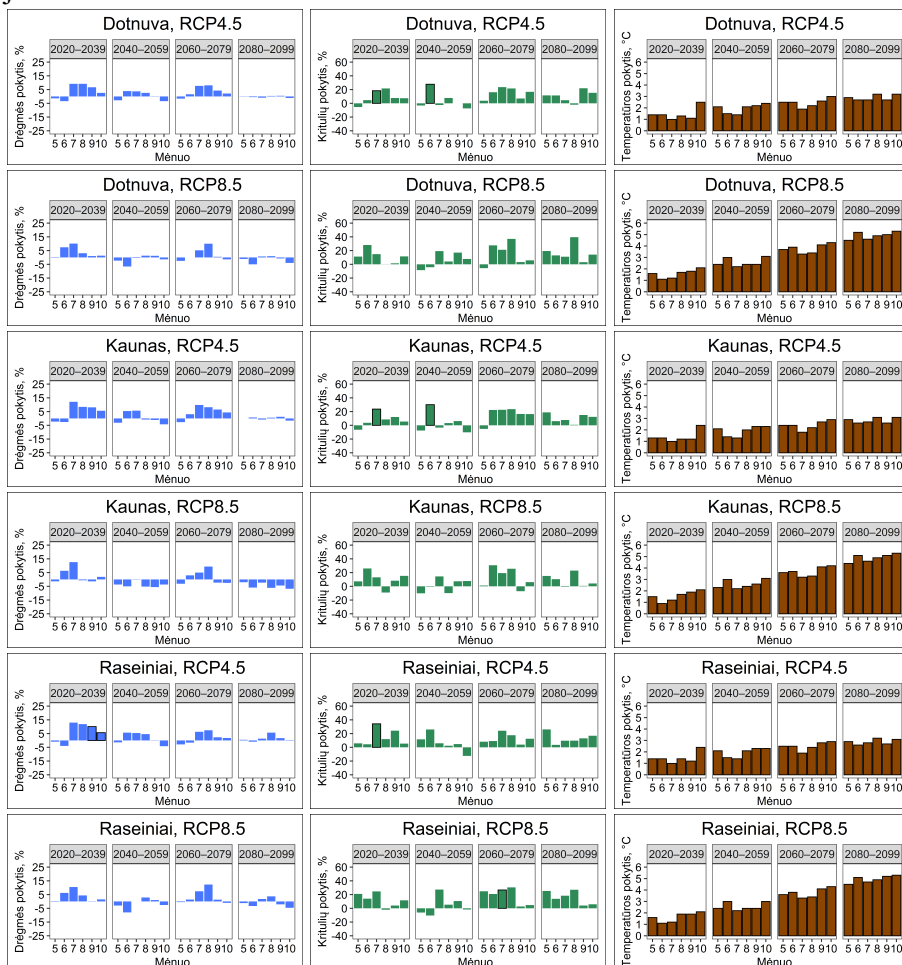
11 priedas. Sausi periodai dirvožemyje pagal 5-tą procentilį (raudonai) ir drėgni periodai dirvožemyje pagal 95 procentilį (mėlynai) 2000–2020 metais. Šalia stoties pavadinimo pažymėta savivaldybės, kurioje yra stotis, standartizuota bulvių (B.) ir cukrinių runkelių (C.) derlingumo reikšmė.



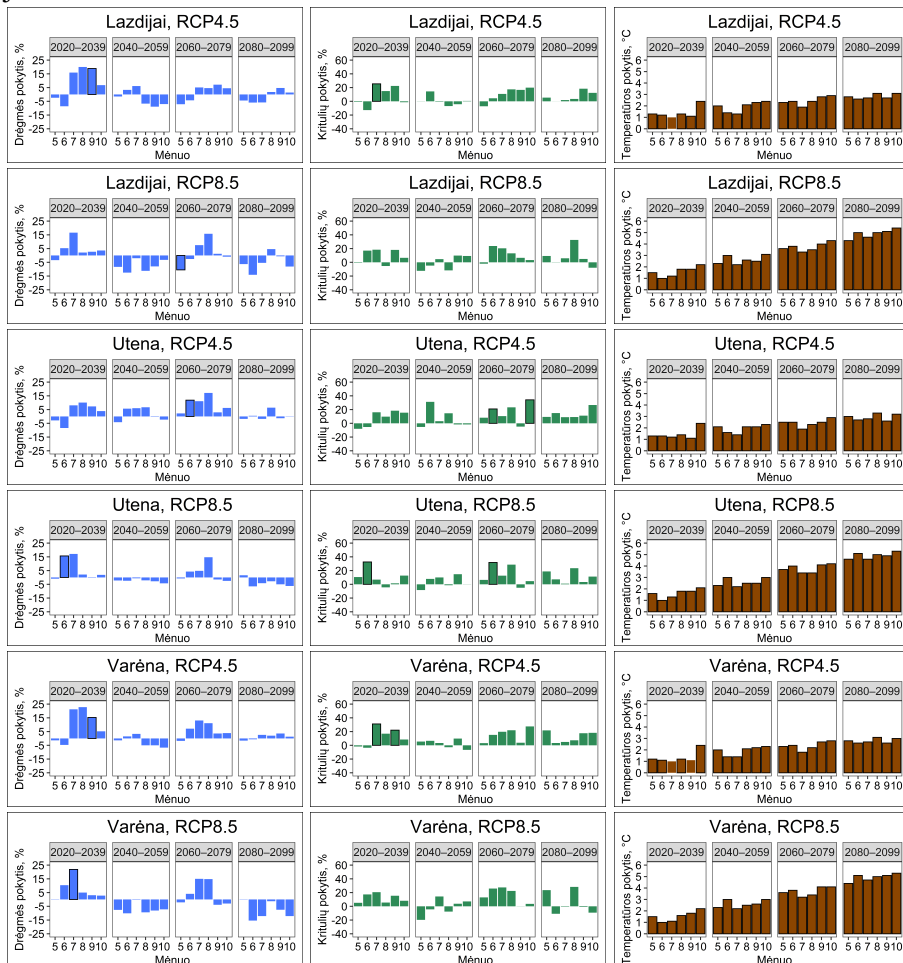
12 priedas. Pirsono koreliacijos koeficientai tarp ESA CCI SM dirvožemio drėgmės produkto ir SWAP modelio drėgmės atskirais metais bei 1979–2007 ir 2008–2020 metais. Statistiškai reikšmingi koreliacijos koeficientai ($p < 0,05$) paryškinti.

| Metai | Dotnuva | Kaunas | Raseiniai | Lazdijai | Utena | Varėna |
|--------------|----------------|---------------|------------------|-----------------|--------------|---------------|
| 1979 | 0,27 | 0,46 | 0,57 | 0,49 | 0,40 | 0,21 |
| 1980 | 0,27 | 0,54 | 0,58 | 0,44 | 0,40 | 0,11 |
| 1981 | 0,42 | 0,47 | 0,58 | 0,34 | 0,55 | 0,29 |
| 1982 | 0,47 | 0,01 | 0,35 | 0,32 | 0,32 | 0,15 |
| 1983 | 0,68 | 0,74 | 0,64 | 0,68 | 0,52 | 0,41 |
| 1984 | 0,07 | 0,60 | 0,44 | 0,63 | 0,59 | 0,63 |
| 1985 | 0,63 | 0,55 | - | 0,45 | 0,35 | 0,32 |
| 1986 | - | - | - | - | - | - |
| 1987 | - | -0,17 | - | -0,24 | 0,02 | - |
| 1988 | - | 0,21 | - | 0,24 | 0,23 | - |
| 1989 | - | 0,27 | - | 0,27 | 0,22 | - |
| 1990 | - | 0,33 | - | 0,04 | -0,15 | - |
| 1991 | 0,77 | 0,43 | 0,87 | 0,28 | 0,36 | -0,21 |
| 1992 | 0,64 | 0,56 | 0,55 | 0,64 | 0,17 | 0,50 |
| 1993 | 0,64 | 0,69 | 0,70 | 0,51 | 0,61 | 0,55 |
| 1994 | 0,59 | 0,47 | 0,52 | 0,53 | 0,71 | 0,51 |
| 1995 | 0,46 | 0,33 | 0,56 | 0,48 | 0,53 | 0,35 |
| 1996 | 0,54 | 0,55 | 0,75 | 0,69 | 0,29 | 0,70 |
| 1997 | 0,63 | 0,35 | 0,62 | 0,28 | 0,26 | 0,26 |
| 1998 | 0,66 | 0,39 | 0,53 | 0,71 | 0,52 | 0,36 |
| 1999 | 0,45 | 0,52 | 0,58 | 0,20 | 0,44 | 0,14 |
| 2000 | 0,81 | 0,51 | 0,57 | 0,71 | 0,07 | 0,66 |
| 2001 | 0,66 | 0,36 | 0,38 | 0,23 | -0,09 | 0,22 |
| 2002 | 0,77 | 0,59 | 0,71 | 0,59 | 0,40 | 0,60 |
| 2003 | 0,73 | 0,84 | 0,75 | 0,67 | 0,74 | 0,67 |
| 2004 | 0,74 | 0,58 | 0,74 | 0,39 | 0,37 | 0,49 |
| 2005 | 0,66 | 0,45 | 0,49 | 0,53 | 0,44 | 0,42 |
| 2006 | 0,79 | 0,79 | 0,78 | 0,56 | 0,67 | 0,59 |
| 2007 | 0,64 | 0,59 | 0,56 | 0,57 | 0,75 | 0,66 |
| 2008 | 0,65 | 0,22 | 0,56 | 0,45 | 0,34 | 0,45 |
| 2009 | 0,51 | 0,15 | 0,61 | 0,47 | 0,30 | 0,44 |
| 2010 | 0,58 | 0,50 | 0,59 | 0,38 | 0,17 | 0,48 |
| 2011 | 0,64 | 0,16 | 0,67 | 0,26 | 0,04 | 0,56 |
| 2012 | 0,60 | 0,41 | 0,66 | 0,40 | 0,27 | 0,59 |
| 2013 | 0,66 | 0,67 | 0,67 | 0,61 | 0,47 | 0,65 |
| 2014 | 0,62 | 0,49 | 0,69 | 0,45 | 0,56 | 0,57 |
| 2015 | 0,73 | 0,67 | 0,56 | 0,60 | 0,69 | 0,63 |
| 2016 | 0,77 | 0,73 | 0,76 | 0,57 | 0,67 | 0,75 |
| 2017 | 0,74 | 0,79 | 0,76 | 0,65 | 0,65 | 0,72 |
| 2018 | 0,61 | 0,69 | 0,69 | 0,71 | 0,60 | 0,66 |
| 2019 | 0,76 | 0,67 | 0,58 | 0,65 | 0,77 | 0,63 |
| 2020 | 0,53 | 0,55 | 0,16 | 0,62 | 0,68 | 0,66 |
| 1979–2007 m. | 0,57 | 0,43 | 0,58 | 0,47 | 0,33 | 0,41 |
| 2008–2020 m. | 0,51 | 0,45 | 0,59 | 0,44 | 0,49 | 0,57 |

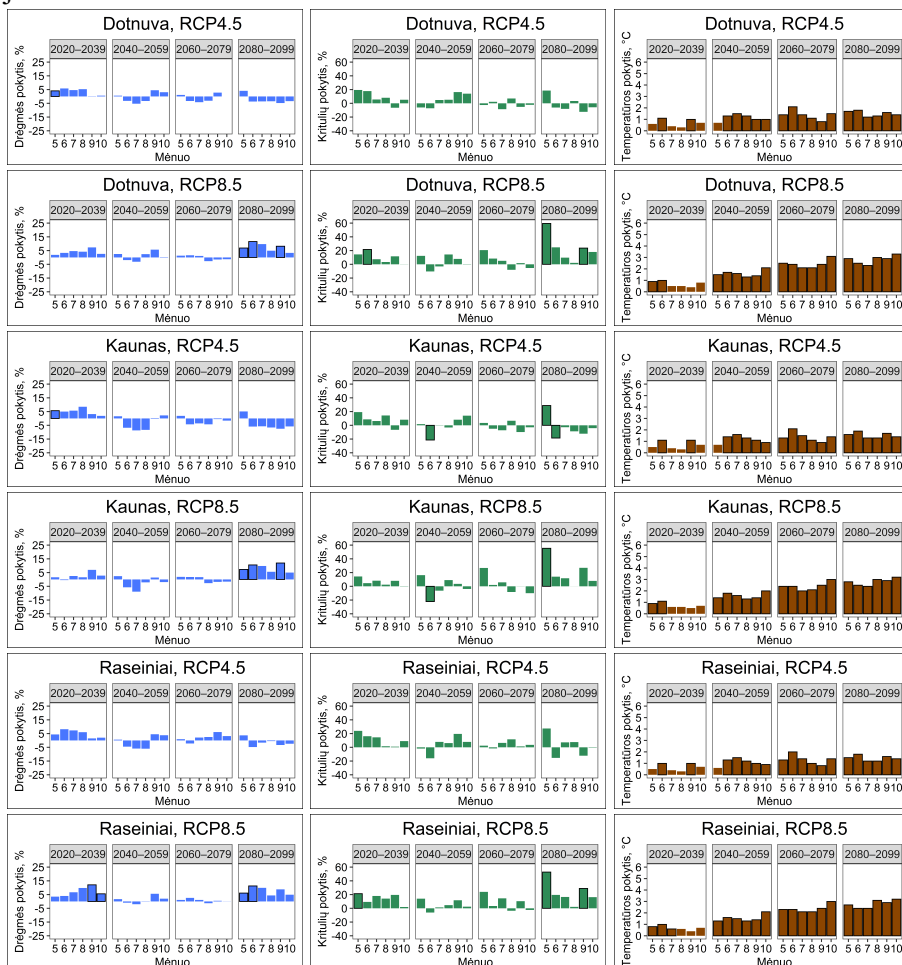
13 priedas. Vidutinis dvidešimtmečių dirvožemio drėgmės (%), kritulių kiekio (%) ir vidutinės oro temperatūros (°C) pokytis gegužės–spalio mėnesiais, palyginti su 1970–2005 metų vidurkiu. Pokytis apskaičiuotas pagal du klimato kaitos scenarijus (RCP4.5 ir RCP8.5) ir MOHC modelio išvesties duomenis priemolinguose dirvožemiuose. Statistiškai reikšmingi pokyčiai pagal Mano-Vitnio-Vilkoksono rangų sumos kriterijų ($p < 0,05$) apvesti juodai.



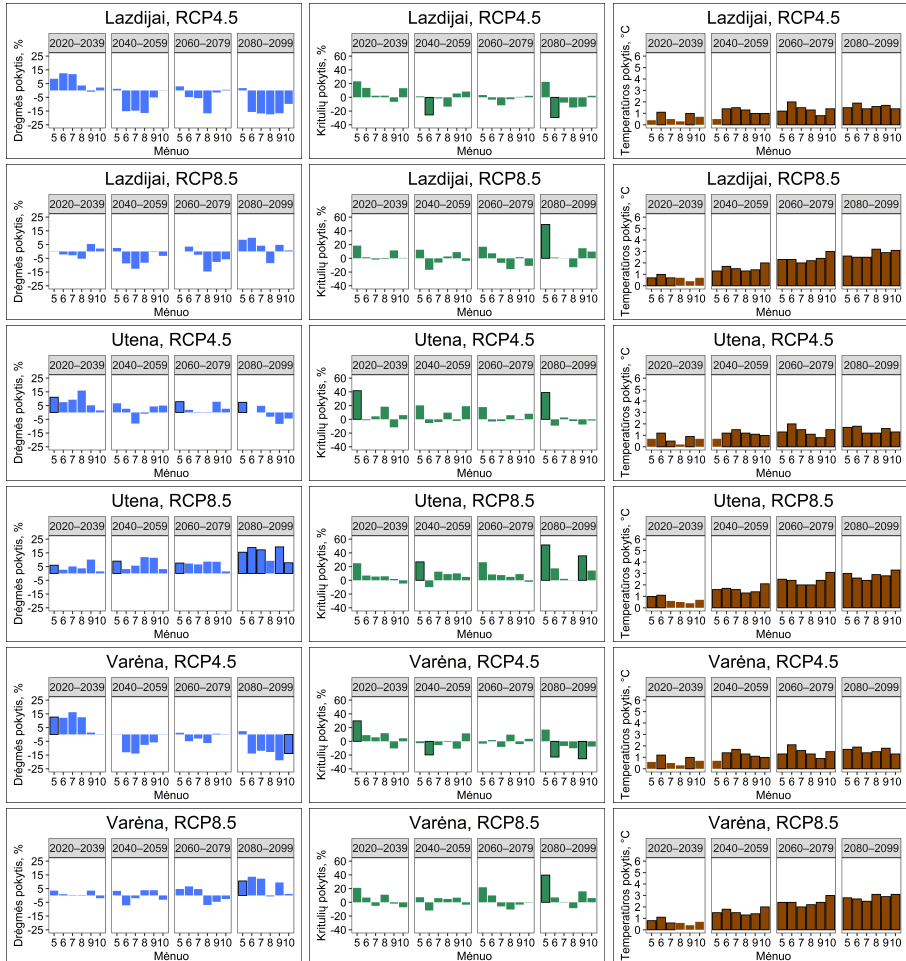
14 priedas. Vidutinis dvidešimtmečių dirvožemio drėgmės (%), kritulių kiekio (%) ir vidutinės oro temperatūros (°C) pokytis gegužės–spalio mėnesiais, palyginti su 1970–2005 metų vidurkiu. Pokytis apskaičiuotas pagal du klimato kaitos scenarijus (RCP4.5 ir RCP8.5) ir MOHC modelio išvesties duomenis priemėlinguose dirvožemiuose. Statistiškai reikšmingi pokyčiai pagal Mano-Vitnio-Vilkoksono rangų sumos kriterijų ($p < 0,05$) apvesti juodai.



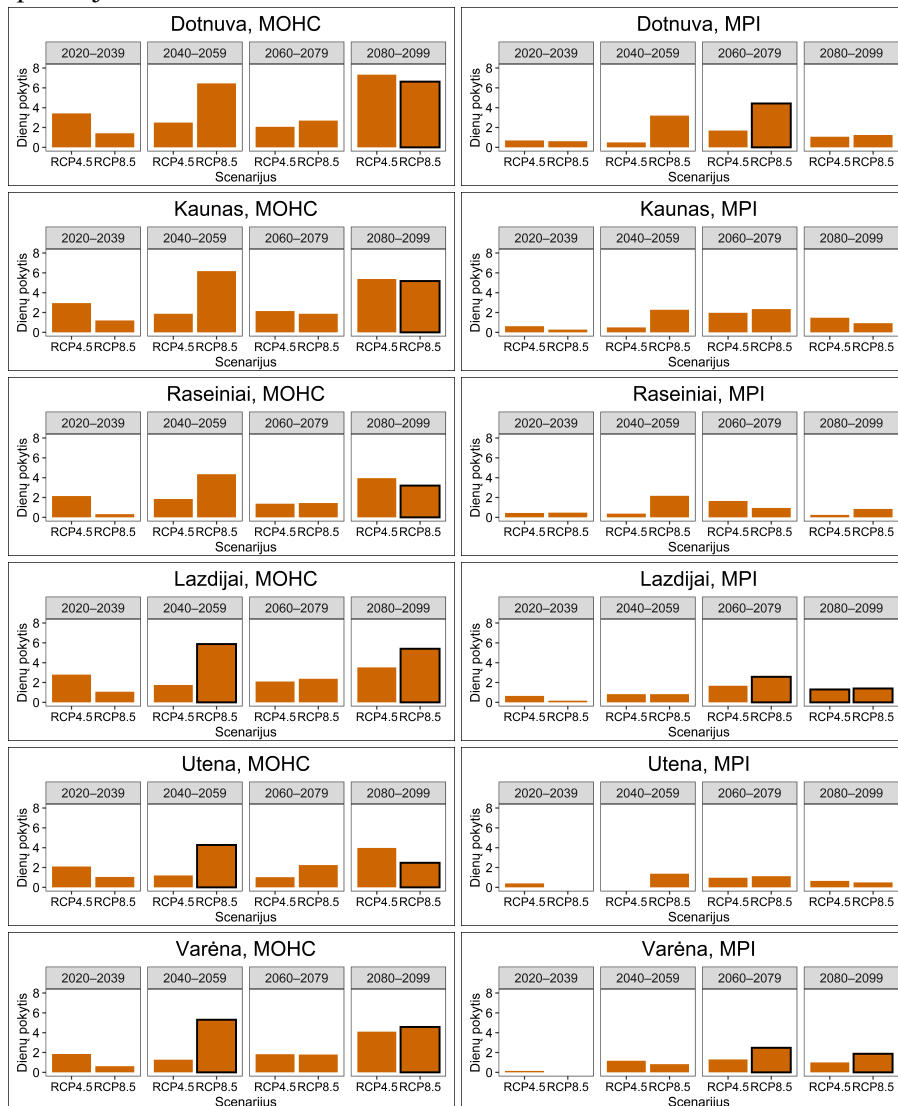
15 priedas. Vidutinis dvidešimtmečių dirvožemio drėgmės (%), kritulių kiekio (%) ir vidutinės oro temperatūros (°C) pokytis gegužės–spalio mėnesiais, palyginti su 1970–2005 metų vidurkiu. Pokytis apskaičiuotas pagal du klimato kaitos scenarijus (RCP4.5 ir RCP8.5) ir MPI modelio išvesties duomenis priemolinguose dirvožemiuose. Statistiškai reikšmingi pokyčiai pagal Mano-Vitnio-Vilkoksono rangų sumos kriterijų ($p < 0,05$) apvesti juodai.



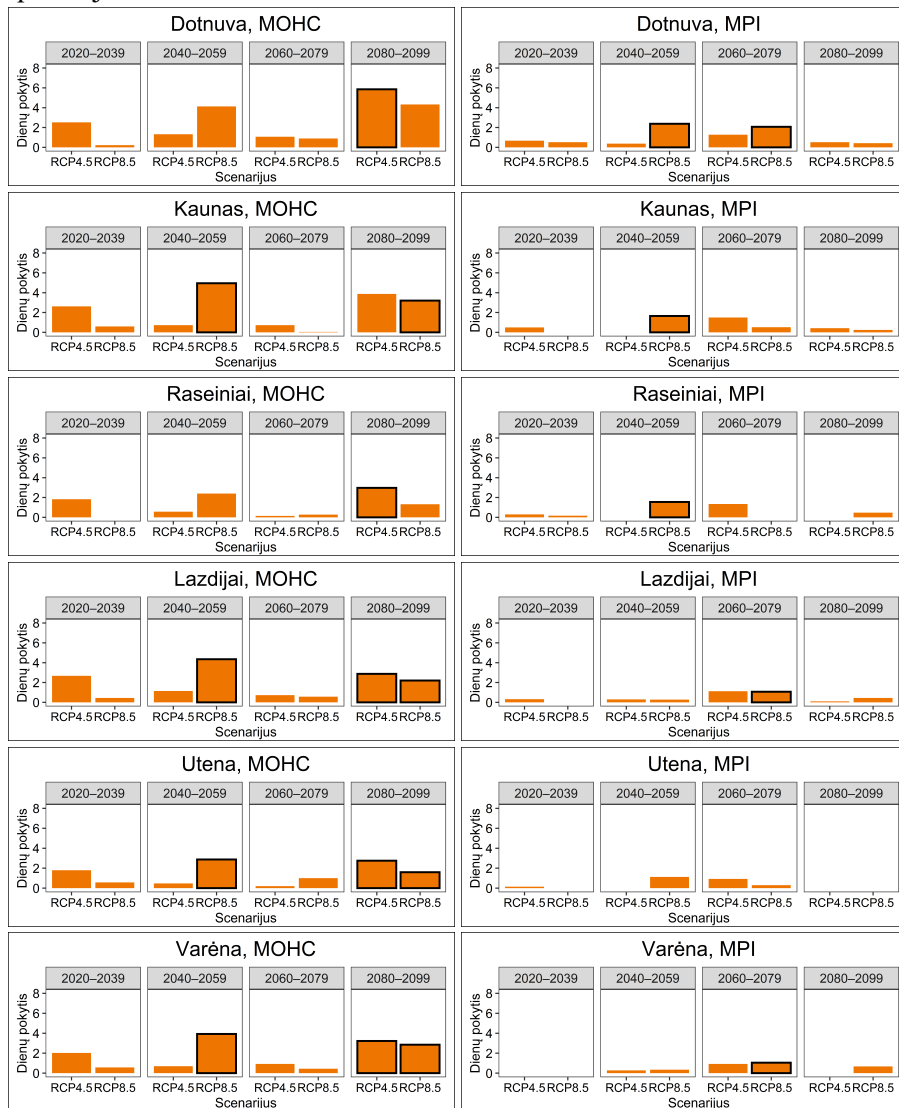
16 priedas. Vidutinis dvidešimtmečių dirvožemio drėgmės (%), kritulių kiekio (%) ir vidutinės oro temperatūros (°C) pokytis gegužės–spalio mėnesiais, palyginti su 1970–2005 metų vidurkiu. Pokytis apskaičiuotas pagal du klimato kaitos scenarijus (RCP4.5 ir RCP8.5) ir MPI modelio išvesties duomenis priemėlinguose dirvožemiuose. Statistiškai reikšmingi pokyčiai pagal Mano-Vitnio-Vilkoksono rangų sumos kriterijų ($p < 0,05$) apvesti juodai.



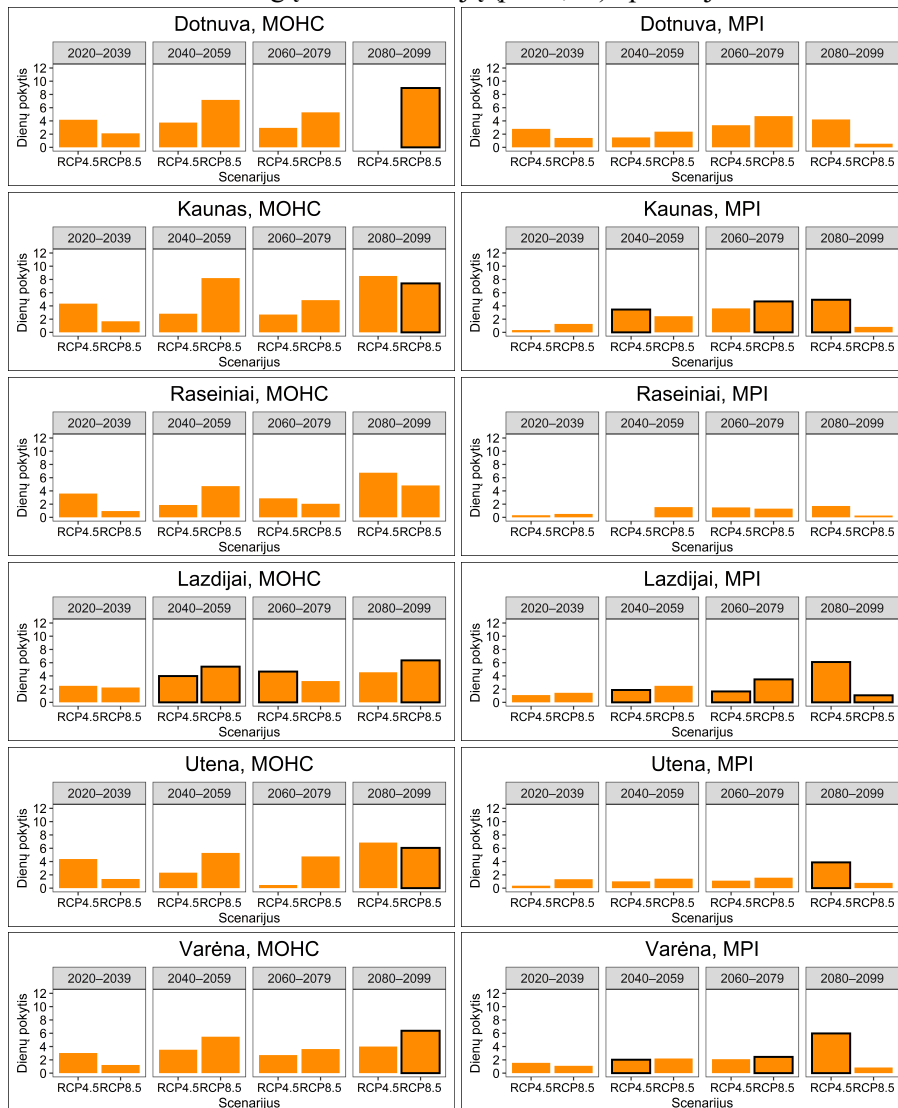
17 priedas. Dienų su TPI15 sausra skaičiaus per dešimtmetį pokytis stotyse, palyginti su 1970–2005 metų vidurkiu. Pokytis apskaičiuotas kiekvienam prognozuojamam dvidešimtmečiui pagal MOHC ir MPI modelių išvesties duomenis ir RCP4.5 ir RCP8.5 klimato scenarijus. Statistiškai reikšmingi pokyčiai pagal Mano-Vitnio-Vilkoksono rangų sumos kriterijų ($p < 0,05$) apvesti juodai.



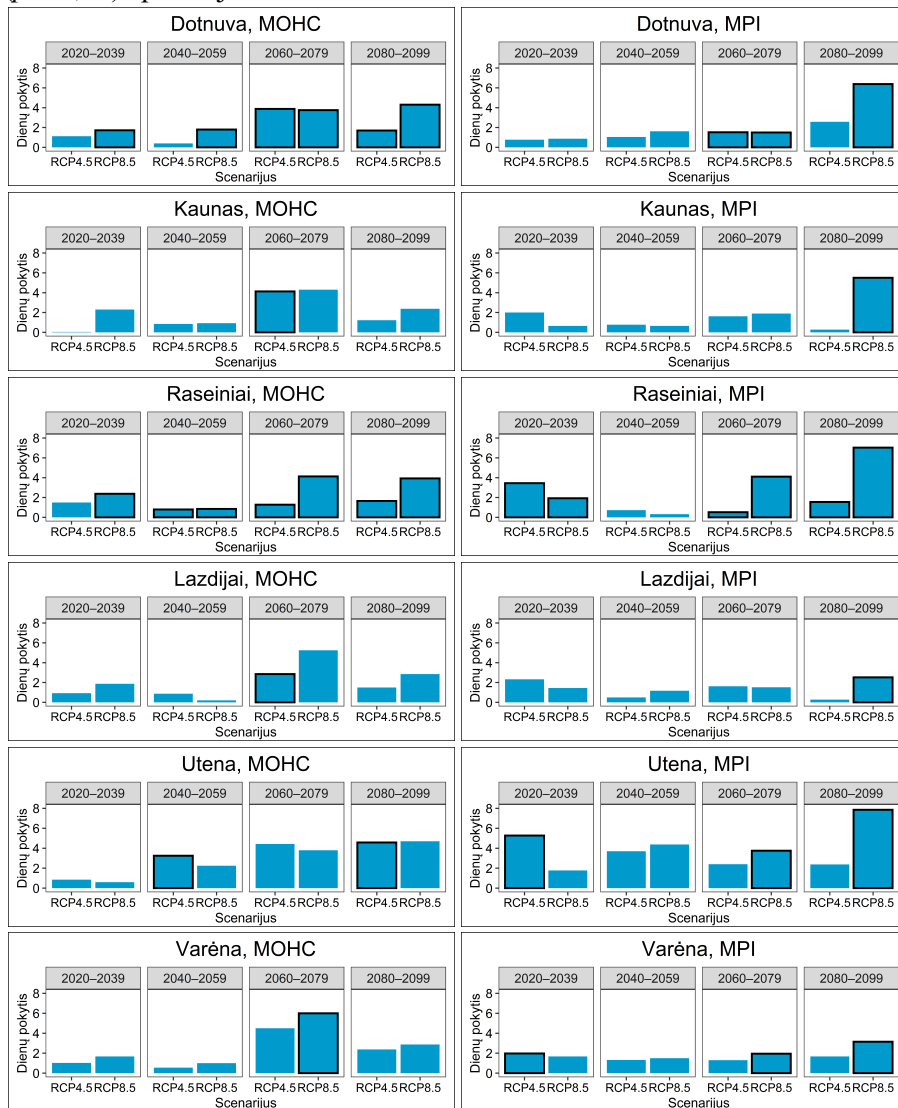
18 priedas. Dienų su TPI30 sausra skaičiaus per dešimtmetį pokytis stotyse, palyginti su 1970–2005 metų vidurkiu. Pokytis apskaičiuotas kiekvienam prognozuojamam dvidešimtmečiui pagal MOHC ir MPI modelių išvesties duomenis ir RCP4.5 ir RCP8.5 klimato scenarijus. Statistiškai reikšmingi pokyčiai pagal Mano-Vitnio-Vilkoksono rangų sumos kriterijų ($p < 0,05$) apvesti juodai.



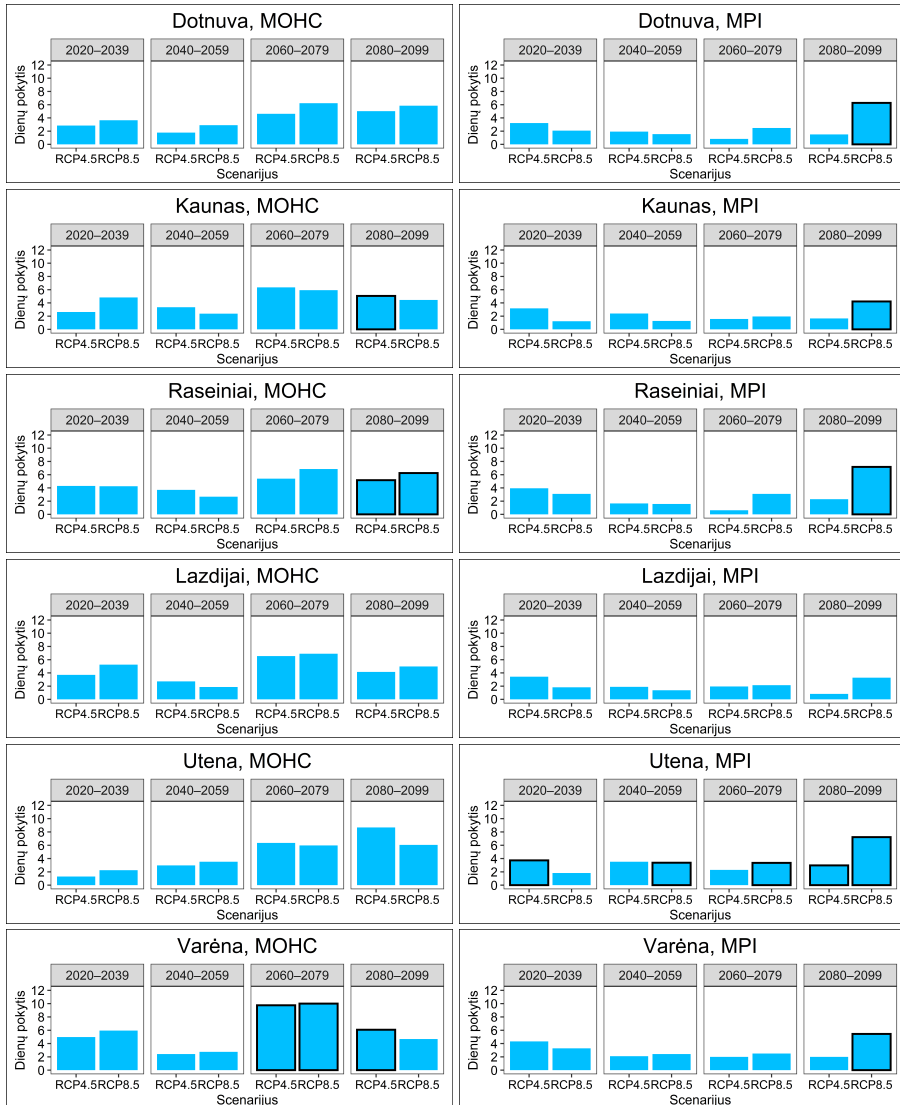
19 priedas. Dienų su sausu periodu dirvožemyje pagal 5-tą procentilį skaičiaus per dešimtmetį pokytis stotyse, palyginti su 1970–2005 metų vidurkiu. Pokytis apskaičiuotas kiekvienam prognozuojamam dvidešimtmečiui pagal MOHC ir MPI modelių išvesties duomenis ir RCP4.5 ir RCP8.5 klimato scenarijus. Statistiškai reikšmingi pokyčiai pagal Mano-Vitnio-Vilkoksono rangų sumos kriterijų ($p < 0,05$) apvesti juodai.



20 priedas. Dienų su ilgu lietingu laikotarpiu skaičiaus per dešimtmetį pokytis stotyse, palyginti su 1970–2005 metų vidurkiu. Pokytis apskaičiuotas kiekvienam prognozuojamam dvidešimtmečiui pagal MOHC ir MPI modelių išvesties duomenis ir RCP4.5 ir RCP8.5 klimato scenarijus. Statistiškai reikšmingi pokyčiai pagal Mano-Vitnio-Vilkoksono rangų sumos kriterijų ($p < 0,05$) apvesti juodai.



21 priedas. Dienų su drėgnu periodu dirvožemyje pagal 95-tą procentilį skaičiaus per dešimtmetį pokytis stotyse, palyginti su 1970–2005 metų vidurkiu. Pokytis apskaičiuotas kiekvienam prognozuojamam dvidešimtmečiui pagal MOHC ir MPI modelių išvesties duomenis ir RCP4.5 ir RCP8.5 klimato scenarijus. Statistiškai reikšmingi pokyčiai pagal Mano-Vitnio-Vilkoksono rangų sumos kriterijų ($p < 0,05$) apvesti juodai.



SUMMARY

1. INTRODUCTION

Soil moisture plays an important role in the hydrological cycle and the health of the environment. Since 2010, it has been classified by the World Meteorological Organization (WMO) as one of the Essential Climate Variables (ECV; WMO, 2010). Soil moisture measurements are crucial for managing and monitoring water resources and assessing their environmental impact (WMO, 2010).

Because moisture is part of the hydrological cycle, it is closely associated with groundwater (Martínez-de la Torre & Miguez-Macho, 2019) and surface water (Immerzeel et al., 2009). It regulates the impact of precipitation on river runoff (Uber et al., 2018). Moisture can affect energy supplies by regulating the flow of water to hydroelectric plants (von Arx et al., 2013). It is inseparable from the landscape as it regulates soil properties and the balance between various substances (Eberhard et al., 2020; Visser et al., 2012). It is also associated with soil structure, resistance, and erosion (Moragoda et al., 2022). Soil moisture has a big impact on agriculture because optimal levels help ensure the proper distribution of microelements in plants and their physiological processes (e.g., photosynthesis and thermoregulation; Butkevičienė, 2018), while both moisture deficit (Cohen et al., 2021; Daryanto et al., 2017; Holsten et al., 2009; Pileckaitė, 2012) and excess (Akhtar & Nazir, 2013) can have a negative effect.

Meteorological indicators alone cannot properly reveal the soil conditions, so moisture measurements are necessary. In Lithuania, agrometeorological measurements are fragmented and not always reliable, so dry and wet conditions are identified using precipitation and temperature data (Lietuvos Respublikos..., 2020). Modelling could also be used to this end.

The Soil–Water–Atmosphere–Plant (SWAP) model (Kroes et al., 2017) is used to estimate vertical water, solute and heat fluxes for soil moisture and vegetation simulations (Jones et al., 2000; Martinez-Ferri et al., 2013; Wang et al., 2020; Wang et al., 2021; Zhao et al., 2020), to assess the impact of climate change on plants (Bartholomeus et al., 2011; Wanti, 2012), to estimate water consumption (Liu et al., 2019), to investigate changes in chemical substances in soil (Eberhard et al., 2020; Visser et al., 2012), and to determine river water levels (Immerzeel et al., 2009). In Lithuania, the SWAP model has been proven to be suitable for modelling the quantity of water and various substances in the soil (Taparauskienė, 2005; Taparauskienė & Heng, 2008).

Soil moisture in this study is modelled using the SWAP model. The modelling period covers the time span from 1951 (historical data) till 2099 (climate projections). The output data was used to distinguish dry and wet periods in soil and to assess the impact of extreme meteorological conditions on soil moisture. The modelling was carried out on sandy and loamy soils.

The object of this work is soil moisture in the territory of Lithuania from 1951 to 2099.

The work aims to perform soil moisture modelling in Lithuania using the SWAP model in sandy and loamy soils, and to evaluate the impact of extreme meteorological conditions on soil moisture.

The objectives of this work

1. To perform calibration and validation of the SWAP model in loamy and sandy soils in Lithuania and assess the suitability of the model.
2. To evaluate changes in soil moisture in Lithuania between 1951 and 2020 and identify the meteorological conditions that affect it.
3. Based on the modelling results, to identify extremely dry and wet periods in soil for the period between 1951 and 2020 and relate them to meteorological conditions during droughts and long rainy periods.
4. To evaluate the relationship between agricultural crop productivity and soil moisture anomalies.
5. To evaluate the potential use of satellite soil moisture products data comparing them with SWAP model moisture.
6. To predict soil moisture changes for the 21st century.

Defending Arguments

1. The SWAP model is suitable for modelling soil moisture and assessing moisture dynamics.
2. SWAP model moisture data can more accurately assess the impact of extreme conditions than temperature and precipitation indices.
3. Dry and wet periods often negatively affect agricultural crop yields, but the magnitude of the impact depends on the timing of their formation relative to vegetative phases.
4. Satellite soil moisture information is inferior in quality and reliability compared with the SWAP model.
5. On the background of rising air temperatures, the magnitude and sign of changes in precipitation by the end of the 21st century will determine upper soil layer moisture level.

Novelty of the Present Study

Soil moisture was assessed using the SWAP model, which has not been widely used in Lithuania (Taparauskienė, 2005; Taparauskienė and Heng, 2008). The calibration and validation of the model were carried out using soil moisture data that had been measured by the most precise gravimetric method (weighing), which made the modelling more reliable. The present study demonstrates that by using historical data and information from various sources, it is possible to perform historical modelling accurately and use the findings to evaluate relationships between meteorological indicators and soil moisture.

The present study is also unique because it conducts moisture modelling over a long period and uses modelling data to evaluate soil moisture conditions during droughts and long rainy periods. The study's findings contribute to the evaluation of the effects of agrometeorological drought and excess water on soil. The model data were also used to evaluate the possibilities of satellite-based soil moisture products use. Finally, output data from climate change models were used to make soil moisture change projections for the 21st century, and the possible changes in extreme soil conditions were determined. Such investigations have not been carried out in Lithuania previously.

Relevance and Applicability of the Present Study

It is hoped that the present study will help address an insufficiency of soil moisture measurements in Lithuania. Without measurements it is not possible to assess the soil moisture accurately that is especially important during extreme weather conditions.

The results of modelling can be used to determine current values of soil moisture, predict future changes, identify extreme conditions, and supplement official meteorological information about soil conditions.

Even with limited directly measured soil moisture data, the SWAP model can be properly calibrated for specific points and accurately simulate soil moisture values. In this way, the model can be used for operational soil moisture forecasting, especially during extreme weather conditions.

2. DATA AND METHODS

2.1 Initial Data and Modelling

The SWAP model is designed to simulate water, solute, and heat flows in the soil and examine the interaction between soil, water, vegetation, and the atmosphere through the entire growing season. The model is one-dimensional, covering the zone from the top of the vegetation to the top of the groundwater layer; the vertical water flow in the soil is calculated using the Richards equation, which is used to simulate soil moisture movement in variously saturated soils (Kroes et al., 2017).

Meteorological Input Data. For SWAP modelling, the following meteorological data are gathered: minimum and maximum daily air temperature (°C), daily precipitation (mm), and evapotranspiration (mm). Evaporation is calculated using the Hargreaves (1994) method.

Soil Data. The volumetric weight of soil in the study area were obtained from archival information from Lithuanian Hydrometeorological Service. Model input also included sand, clay, silt, and organic matter fractions (g/g) taken from the European Soil Data Centre (ESDAC) with a 1 km spatial resolution, taking into account the granulometric composition of the soils at the meteorological stations.

The modelling for the vertical soil profile was carried to a depth of 360 cm with a resolution of 1 cm. The profile was under an unirrigated grass cover, as soil moisture was measured at the LHMT network stations. The root zone depth for all points was selected as 130 cm (based on ESDAC data). During the calibration of the model, it was assumed that precipitation would be considered as snowfall at temperatures below -2 °C, and water movement would cease when the soil temperature dropped to -1 °C. The soil moisture output was converted from cm³/cm³ per soil centimetre to millimetres for the 0–20 cm layer of soil.

Model Calibration and Validation. The SWAP model provides experimentally determined model parameters for different soils in the Netherlands (Wösten et al., 2013). Since not all necessary model parameters were available, calibration was performed using the most suitable soil parameter sets, for which the model output during the calibration period (May–September 1982–1991) was closest to the soil moisture (minimum root-mean-square error (RMSE) and a maximum determination coefficient R^2). Model validation was also performed to verify the suitability of the selected parameters for the period from 1992 to 1998 (using RMSE and R^2).

The calibration and validation of the model were performed at six meteorological stations where gravimetric soil moisture measurements had been carried out (Figure 1). This method is considered the standard because it is the only direct way to measure the amount of water in the soil (Carlaw, 2000; Dorigo et al., 2011). Initial soil moisture data were collected from the archive of the Lithuanian Hydrometeorological Service. The data from the stations were both homogenous and comprehensive.

The stations Dotnuva, Kaunas, and Raseiniai represent a region of intensive agriculture in central Lithuania and are characterized by heavier soils. The stations Lazdijai, Utena, and Varėna represent the eastern and southern regions, where lighter soils predominate (Volungevičius & Kavaliauskas, 2012).

Soil moisture measurements were performed (every 10 days) in fields that had been under grass. In this study data from 1982 to 1998 were used. To ensure that only the high quality data was used for model calibration and validation, a two-level quality control was performed. First, illogical values were discarded. Secondly, a multiple regression equation was created to predict soil moisture changes based on air temperature and precipitation. Values that deviated the most from the curve (4% of all data) were excluded from further analysis.



Figure 1. Locations of the meteorological stations, whose data were used in the study.

After calibrating and validating the model, a simulation was carried out for the period 1951 to 2020 using meteorological station data and up to 2099 using climate projection data (daily resolution). The study used 0–20 cm soil moisture data except when comparisons were made with satellite soil moisture

products. In such case the depth was limited to 0–5 cm. The main steps of the study are schematically illustrated in Figure 2.

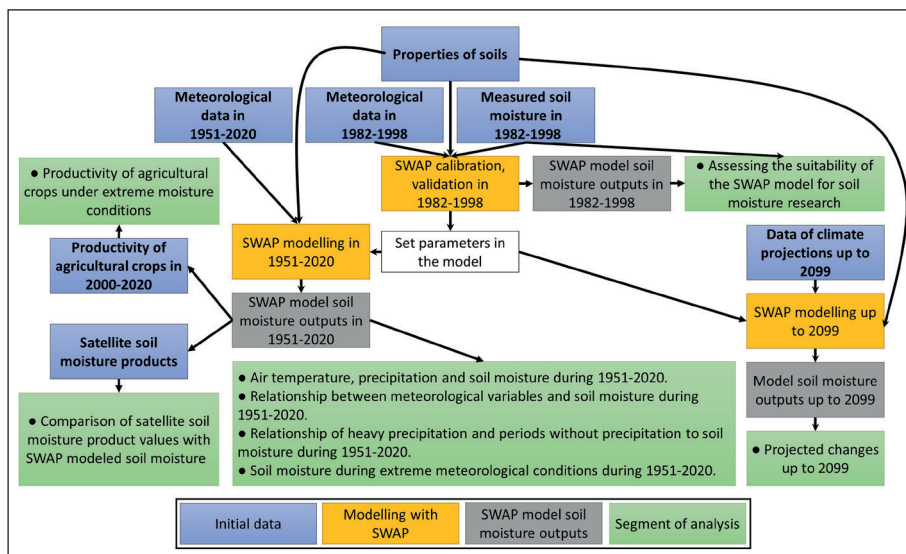


Figure 2. Conceptual diagram of the modelling process and data analysis.

2.2 Analysis

Analysis of Average Conditions and Changes. Data from 18 meteorological stations for the period January–December 1951–2020 were used to assess changes in air temperature and precipitation. Soil moisture conditions and changes were analyzed using the SWAP model at six meteorological stations where the model was calibrated and validated. The changes were assessed using Sen’s slope, and the statistical significance of the changes was evaluated using the Mann–Kendall test ($p < .05$).

Impact of Heavy Precipitation and Precipitation-Free Periods on Soil Moisture. Changes in soil moisture were also assessed using data about heavy precipitation events (≥ 10 mm) and cases when no precipitation occurred for 3–10 consecutive days. The impact on soil moisture in loamy and sandy soils was evaluated using a second-degree polynomial function (for heavy precipitation) and a multiple regression equation (for precipitation-free periods).

Droughts based on the temperature and precipitation index TPI and **long rainy periods** (based on 60-day precipitation) are officially used in Lithuania to identify extremely dry and excessively wet weather conditions.

Daily TPI values were calculated using the equation:

$$TPI_{dn} = P_n / T_{vidn} \times 100$$

where n – the number of days; P_n – precipitation amount (mm) for n days; and T_{vidn} – the sum of n -days' average daily air temperature ($^{\circ}\text{C}$).

The drought index TPI_{d30} was calculated using 30 days of temperature and precipitation data. Dangerous drought was defined when the 15-day average TPI_{d30} (TPI_{15}) was less than 3.5. Extreme drought was identified when the TPI_{d30} average of 30 days (TPI_{30}) was less than 3.5. TPI_{d30} was calculated only when the 30-day average air temperature was 5°C or higher. The present study also used other ways to calculate of TPI_{dn} , with n – 10 and 20 days.

Long rainy periods were distinguished for period from May to October, using moving 60-day values. If the 60-day amount of precipitation exceeded the established threshold (which is 2.8 standard deviations above the mean), then the long rainy period was recorded.

Identification of Dry and Wet Periods in Soil. Moisture during droughts and long rainy periods was close to the respective 10th and 90th percentiles of the soil moisture distribution. Based on this, extremely dry and wet periods (according to values of soil moisture) were identified using the 5th, 10th, 90th, 95th percentile values (Figure 3) for each day from 1 May to 31 October. These were smoothed using a second-degree polynomial curve. The meteorological conditions that lead to the onset of dry and wet periods were evaluated, and the extent to which droughts and long rainy periods corresponded to soil moisture levels was assessed.

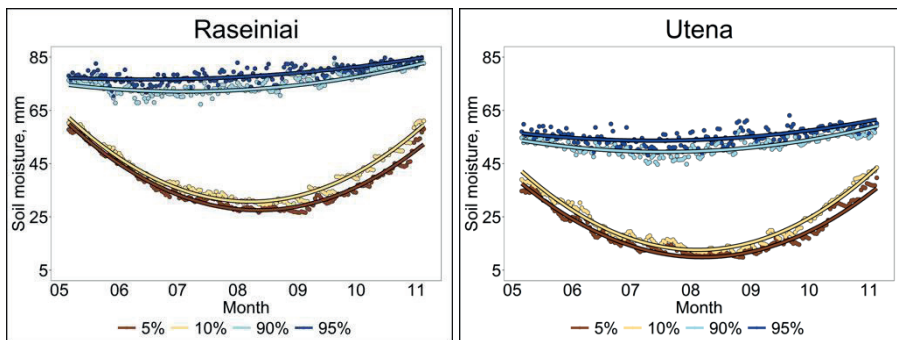


Figure 3. Regression curves approximating the values of the 5th, 10th, 90th, and 95th percentiles of soil moisture distribution in Raseiniai and Utena.

Impact of Dry and Wet Periods on Agricultural Crop Yields. The study used annual yield data (t/ha) for winter and summer grains and root vegetables (potatoes and sugar beet) from the Lithuanian Statistics Department data archive for the period 2000 to 2020. They were obtained for each municipality

in the area of each meteorological station. Standardized yield values were calculated, allowing for the identification of anomalous yield years and their relationship with dry and wet periods.

Comparison of Satellite Soil Moisture and SWAP-Modelled Soil Moisture Values. The SWAP-modelled soil moisture (for 0–5 cm layers) were compared with those from Copernicus SSM (surface soil moisture), as measured by the synthetic aperture radar (SAR) on the Sentinel-1 satellite (1 km resolution) for the period 2017–2020, along with the European Space Agency’s Climate Change Initiative Soil Moisture (ESA CCI SM) product’s passive and active sensor measurements (25 km resolution) for the period 1978–2020.

Impact of Projected Climate Change on Soil Moisture. Two climate change scenarios were used for climate projections: moderate (RCP4.5) and pessimistic (RCP8.5). The regional climate model RCA4 (resolution $0.11^\circ \times 0.11^\circ$) was chosen along with two global circulation models: MOHC-HadGEM2-ES (MOHC) and MPI-M-MPI-ESM-LR (MPI).

Prognostic meteorological indicators (average, minimum, and maximum daily air temperature and daily precipitation) data were obtained from the WCRP CORDEX database. After creating the meteorological forecasts, SWAP modelling was performed for the period up to 2099.

3. RESULTS

3.1 Evaluation of the SWAP Model’s Suitability for Soil Moisture Studies

During the calibration of the model, it was found that R^2 between measured and simulated moisture values at the stations ranged from 0.49 to 0.71 (RMSE 8.1–10.8; Figure 4 and Table 1). During validation period, R^2 between measured and simulated moisture values ranged from 0.45 to 0.74 (RMSE 7.7–10.1). Because the RMSE in the validation and calibration periods were similar, it can be argued that the parameters selected during model calibration for 1982–1991 were suitable for validation period (1992–1998). Therefore, the model is suitable for soil moisture modelling at different points and periods when no soil moisture measurements were available.

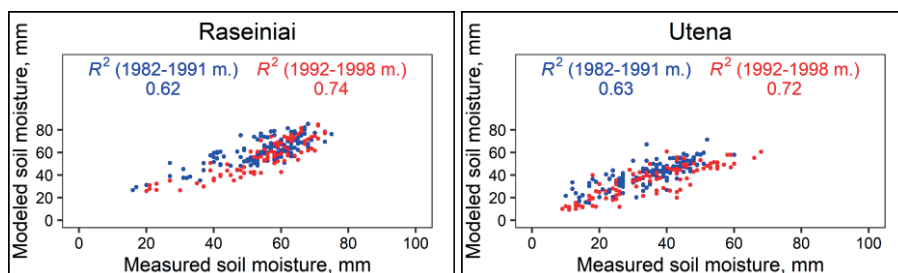


Figure 4. Relationship between measured and modelled soil moisture during the calibration period (1982–1991; blue dots) and validation period (1992–1998; red dots) for Raseiniai and Utena.

Table 1. Measured (MAT., mm) and modelled (MOD., mm) the average soil moisture content in the 0–20 cm depth, mean error (ME, mm), mean error percentage (ME%, %), root mean square error (RMSE, mm), number of years with RMSE \geq 10 and its percentage from the total number of years, coefficient of determination (R^2), and Pearson's linear correlation coefficient (r) between modelled and measured values during the calibration and validation periods (May–September 1982–1998). All r values are statistically significant ($p < .05$).

| Station (number of years) | MAT. | MOD. | ME | ME% | RMSE | RMSE \geq 10 | R^2 | r |
|---------------------------------|------|------|------|-------|------|----------------|-------|------|
| Calibration period (1982–1991) | | | | | | | | |
| Dotnuva (10) | 58.2 | 57.0 | -1.2 | -2.1 | 9.0 | 20 | 0.67 | 0.82 |
| Kaunas (7) | 59.1 | 58.9 | -0.2 | -0.3 | 8.2 | 0 | 0.71 | 0.84 |
| Raseiniai (9) | 54.6 | 61.7 | 7.1 | 13.0 | 10.4 | 44 | 0.62 | 0.79 |
| Lazdijai (10) | 33.1 | 30.1 | -3.0 | -9.1 | 9.8 | 40 | 0.49 | 0.70 |
| Utena (10) | 34.3 | 40.8 | 6.5 | 19.0 | 9.3 | 30 | 0.62 | 0.79 |
| Varėna (10) | 33.4 | 37.1 | 3.7 | 11.1 | 8.1 | 10 | 0.71 | 0.84 |
| Validation period (1992–1998) | | | | | | | | |
| Dotnuva (7) | 58.1 | 55.9 | -2.2 | -3.8 | 9.9 | 43 | 0.72 | 0.85 |
| Kaunas (3) | 57.1 | 55.5 | -1.6 | -2.8 | 9.0 | 0 | 0.45 | 0.67 |
| Raseiniai (7) | 54.8 | 56.4 | 1.6 | 2.9 | 7.7 | 0 | 0.74 | 0.86 |
| Lazdijai (7) | 38.9 | 33.6 | -5.3 | -13.6 | 9.6 | 43 | 0.71 | 0.84 |
| Utena (7) | 35.4 | 34.9 | -0.5 | -1.4 | 8.0 | 29 | 0.72 | 0.85 |
| Varėna (6) | 27.5 | 33.7 | 6.2 | 22.5 | 10.1 | 33 | 0.59 | 0.77 |

Differences between modelled and measured soil moisture at the same station can vary in different years (Figure 5). The relationship between measurement and modelling results cannot be perfect, as it is determined not only by the validity of the model and the accuracy of its calibration, but also by some uncertainty in the soil moisture measurements. The obtained values

during the calibration and validation periods were in line with other studies conducted using the SWAP model (Kim et al., 2015; Ma et al., 2011; Martinez-Ferri et al., 2013; Taparauskienė & Heng, 2008).

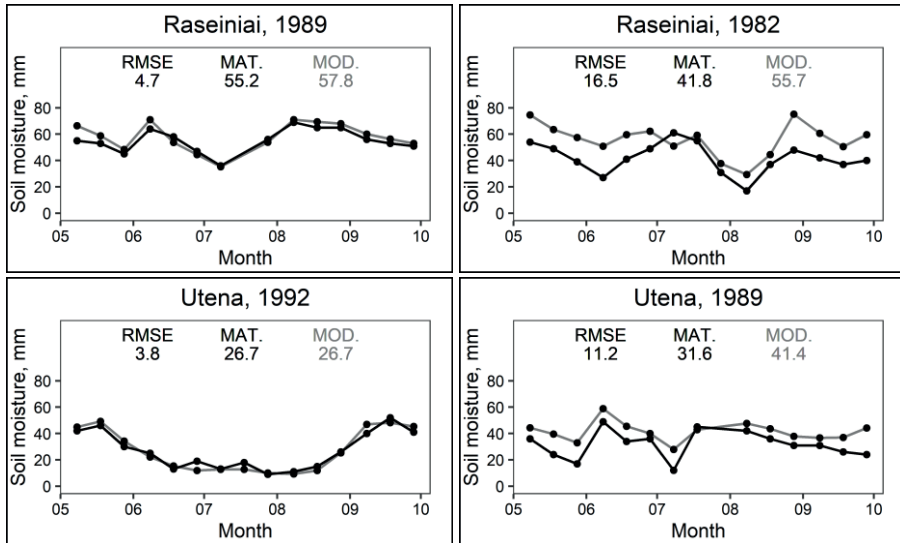


Figure 5. Measured (black line) and modelled (grey line) 0–20 cm soil moisture, where the root mean square error (RMSE, mm) of the difference between measured and modelled soil moisture is the lowest (on the left) and highest (on the right) for Raseiniai and Utena in 1982–1998. MAT. – average values of measurements (mm), MOD. – average values of model (mm).

3.2 Changes in Meteorological Conditions and Soil Moisture

Average air temperature and precipitation changes for the six stations were similar to those of Lithuania as a whole. Between 1951 and 2020, air temperature increased in all months at all six stations; most of the changes were statistically significant ($p < .05$). The greatest changes were observed during the cold season (2.9–5.1 °C; Figure 6A). The smallest changes (the mostly statistically insignificant) were observed in June and October (0.3–1.2 °C).

Changes in precipitation were mostly statistically insignificant (Figure 6B). The greatest and statistically significant positive changes in precipitation (up to 57%) were observed in January at all stations, and in February and December at some stations. March, July, and October showed statistically insignificant positive changes in precipitation, while April and September

showed negative changes. The significance and sign of changes in the remaining months varied across stations.

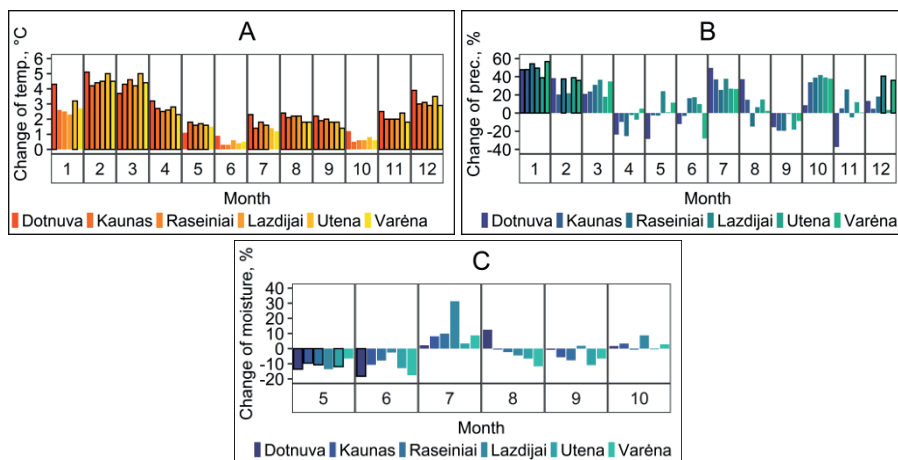


Figure 6. Long-term changes in monthly air temperature (A), precipitation amount (B), and soil moisture (C), 1951–2020. Statistically significant changes ($p < .05$) are highlighted with a border.

The average seasonal soil moisture level in loamy soils (Dotnuva, Kaunas, and Raseiniai) ranged from 57.3 to 59.3 mm, and in sandy soils (Lazdijai, Utena, and Varėna) from 33.7 to 37.9 mm. The lowest soil moisture values were observed in July and August, while the highest at the beginning and end of the season. The most significant changes were recorded in the first half of the season: negative changes in May (up to -14%; statistically significant changes in majority of stations), June (up to -18%), and positive changes in July (up to +31%) (Figure 6C). The changes partly corresponded to changes in precipitation regime.

The distribution of daily soil moisture values differed between loamy and sandy soils. Loamy soils exhibited greater negative asymmetry than sandy soils (Figure 7). The absolute minimum soil moisture value in sandy soils was 8.5 mm (Lazdijai), and in loamy soils – 23.3 mm (Kaunas). The highest moisture value recorded in sandy soils was 85.7 mm in Utena; in loamy soils, the maximum value of 86 mm was recorded at all stations. The moisture fluctuations in sandy soils were greater than in loamy soils. These were due to the different infiltrative properties of the soils.

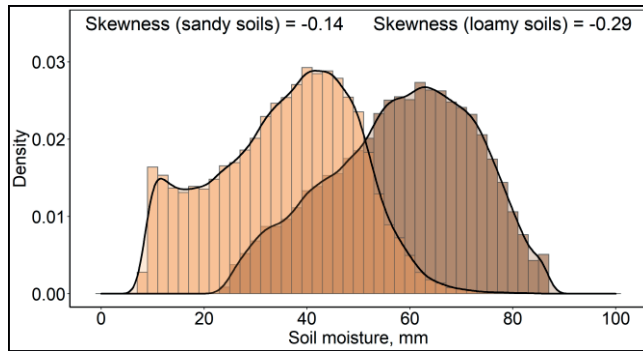


Figure 7. Distribution of daily soil moisture values in loamy soils (dark brown area) and sandy soils (light brown area) at 0–20 cm in May to October 1951–2020.

Daily moisture values were most closely related to TPI_{d30} values, reflecting the ratio of air temperature and precipitation in the preceding 30 days ($r = 0.69\text{--}0.71$, $p < .05$; Figure 8). The relationship between soil moisture and TPI_{d30} was closest in the middle of the season.

The Effect of Heavy Precipitation Events on Soil Moisture. In evaluating the effect of heavy daily precipitation events (≥ 10 mm), it was found that the changes in moisture strongly depend on previous moisture values. In loamy soils, the moisture usually increased after heavy precipitation, regardless of the previous moisture value. However, in sandy soils, particularly when moisture values were very high (above 60 mm), even with a precipitation rate of 10–20 mm per day, changes in soil moisture were liable to be negative (Figure 9). This is related to higher infiltration rate in sandy soils, which cannot be compensated even with such heavy precipitation. Meanwhile, when precipitation amount reached 20–30 mm per day or more, the soil moisture in sandy soils increased in almost every case.

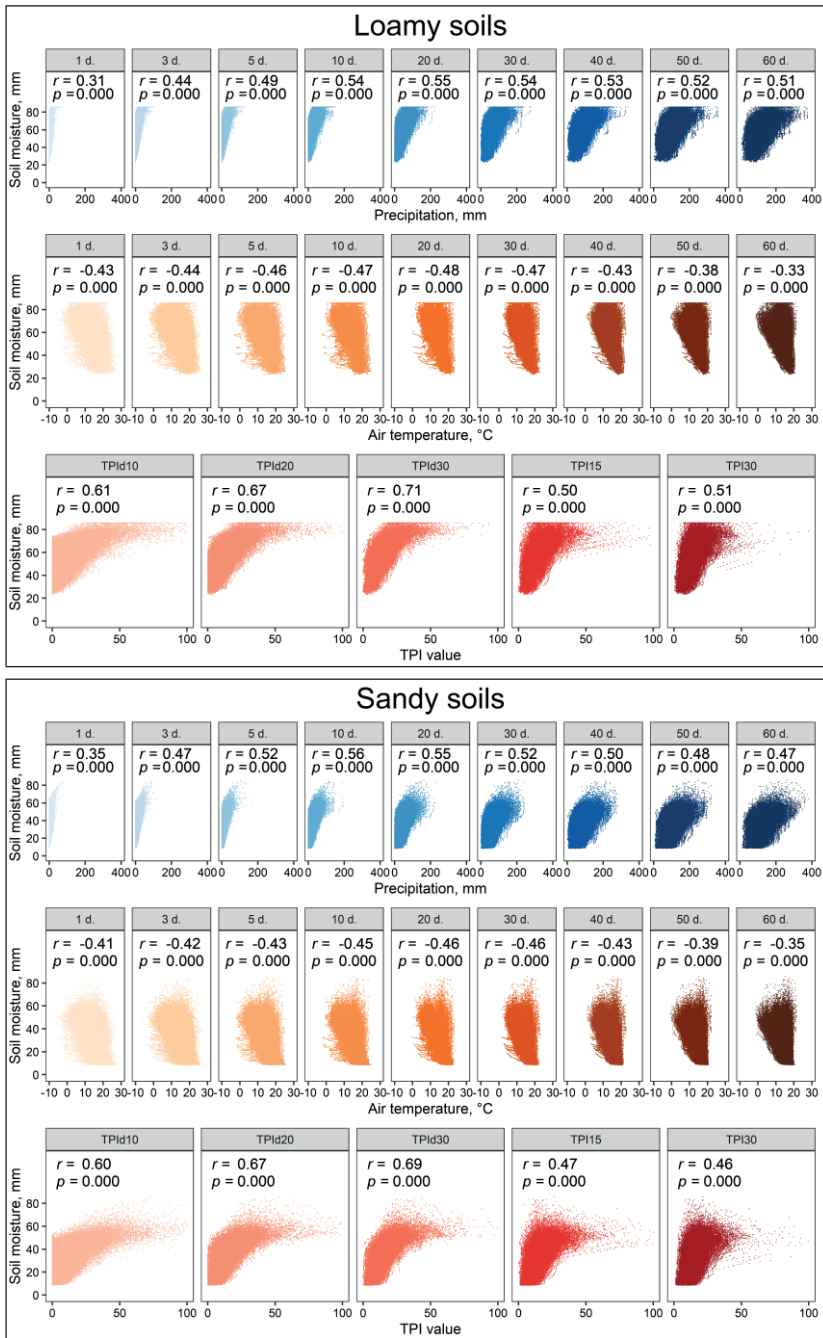


Figure 8. Relationship between 1–60 days observed precipitation (mm), average temperature (°C), daily TPI index values (TPI_{d10}, TPI_{d20}, TPI_{d30}, TPI₁₅, TPI₃₀) and daily 0–20 cm soil moisture (mm) in loamy and sandy soils in May to October 1951–2020.

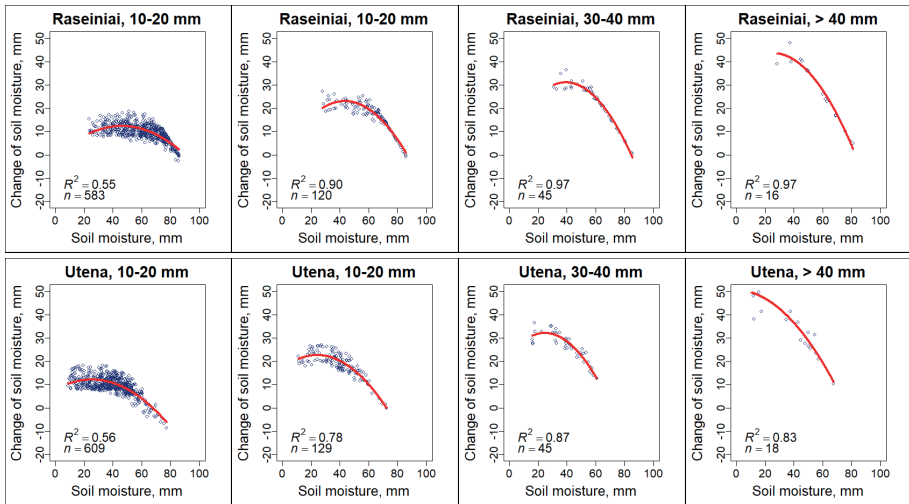


Figure 9. Soil moisture change (y-axis) after 10–20 mm, 20–30 mm, 30–40 mm and > 40 mm daily precipitation amount as a function of soil moisture before precipitation (x-axis) in May to September 1951–2020. The red line represents the curve of a second-degree polynomial function. All relationships are statistically significant with $p < .05$.

Impact of Precipitation-Free Periods on Soil Moisture. When evaluating the impact of precipitation-free (0 mm per day) periods of varying duration on soil moisture, it was found that the longer the period without rain and the higher the initial soil moisture content, the more soil moisture values decreased. This was due to intense infiltration into deeper soil layers. For example, in loamy soils with an initial moisture level of 50–60 mm before precipitation-free periods, the moisture content decreased by around 5 mm after 3 days, around 7–8 mm after 5 days, and around 12–14 mm after 10 days.

Infiltration was stronger in sandy soils than in loamy soils (Figure 10). For example, if it did not rain for 5 days and the soil moisture content before was 50–60 mm, it subsequently decreased by around 7–8 mm in loamy soils and by 10–12 mm in sandy soils. When the moisture content reached around 25 mm in loamy soils and around 10 mm in sandy soils, moisture content barely changed regardless of the duration of the precipitation-free period.

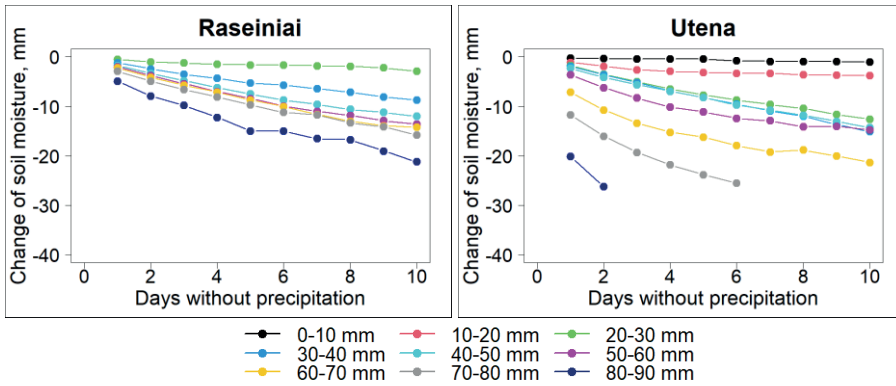


Figure 10. Average changes in soil moisture values (mm) during various precipitation-free periods in May to September 1951–2020.

The effects of heavy precipitation and precipitation-free periods on soil moisture have clear practical implications. For example, the information gathered makes it possible to predict soil moisture values during extreme weather conditions.

3.3 Soil Moisture during Extreme Meteorological Conditions

Droughts Based on TPI30 and Dry Periods in Soil. Droughts based on TPI30 were observed primarily at the beginning of the season (i.e., the end of May to mid-June) and the end of August to mid-September. On average, 1.0–2.4 severe droughts were recorded per decade at the six stations from 1951–2020. Their average duration was 11–18 days.

Soil moisture during droughts identified by TPI30 depended on both the intensity of the drought and the soil type. The minimum soil moisture values during the most droughts were close to the soil moisture value on the first day of drought, and the differences between two values were only a few millilitres. This suggests that the first day of TPI30 drought usually took place when the soil moisture had already reached its minimum and the drought had peaked. It can be stated that the start of drought was identified too late (Figure 11).

Soil moisture during severe droughts exhibited a typical seasonal pattern. Even during drought, the moisture content in spring and autumn was on average higher than in the middle of the season. Therefore, the identification of dry conditions in the soil should take seasonality into account. The 5th and 10th percentiles of soil moisture were used for this purpose.

Dry periods based on the 5th percentile was recorded on average 2.9–4.5 years per decade and lasted on average of 8–11 days. Such dry periods started

around 12 days earlier than the droughts based on TPI30. Dry periods in the soil identified 74% of severe droughts based on TPI30.

The soil moisture at the beginning of dry periods was mostly predetermined by average air temperature of the preceding 20–40 days in both loamy and sandy soils ($r = -0.83 - -0.95$). Precipitation was also an important factor, but dry periods usually occurred when precipitation was low, so statistically, air temperature values were more important.

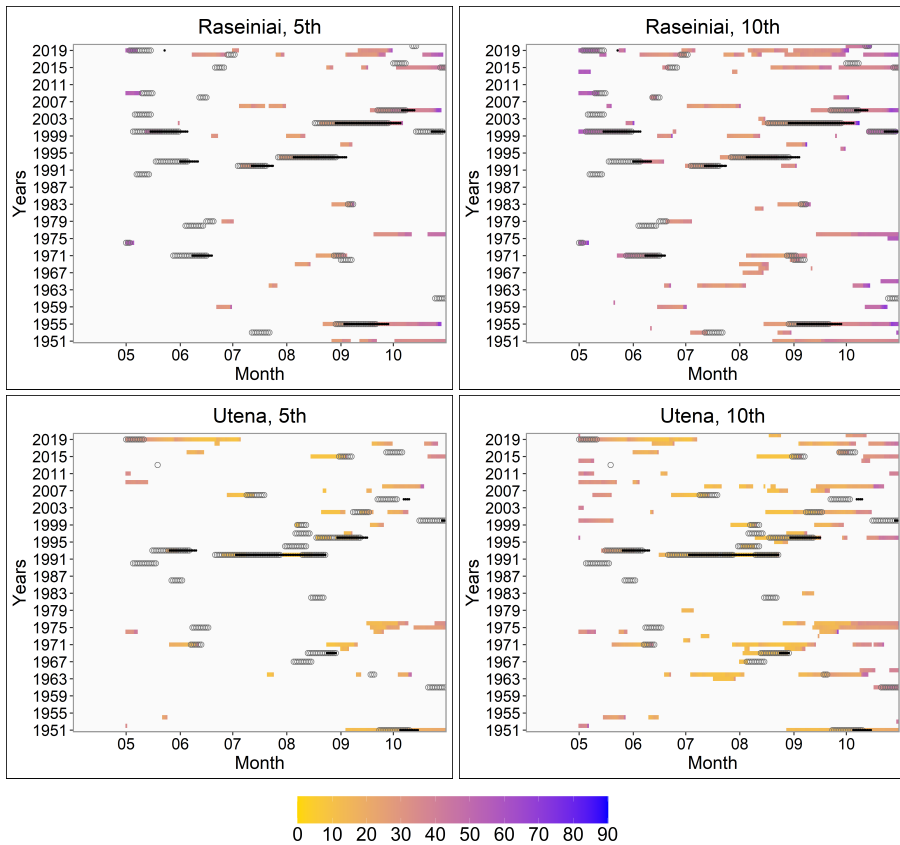


Figure 11. Soil moisture during dry periods (coloured scale, mm). Dry periods are distinguished using the 5th (left) and 10th (right) percentiles of soil moisture in loamy (Raseiniai) and sandy (Utena) soils. Empty circles indicate droughts according to TPI15, while filled circles indicate droughts according to TPI30.

Long Rainy Periods and Wet Periods in Soil. Long rainy periods for all stations were more common in June, September, and early October. On average, 0.6–1.4 cases of long rainy periods were recorded per every 10 years, with an average duration of 10–18 days.

At all stations with loamy and sandy soils, soil moisture on the first day of long rainy periods was close to the maximum (in loamy soils 82.5–85.5 mm, and in sandy soils 65.3–67.9). So, the first day of long rainy periods usually occurred when the soil moisture had already reached its maximum.

In contrast with droughts, soil moisture during long rainy periods did not have a seasonal pattern and were highly variable, particularly in sandy soils (*Standard deviation* – 9.1 mm; in loamy soils – 4.5 mm). Around 4–5 years with wet periods in soil were recorded per decade based on the 95th percentile, with an average duration of 4–7.5 days. Soil moisture indicators identified 87% of all long rainy periods (Figure 12).

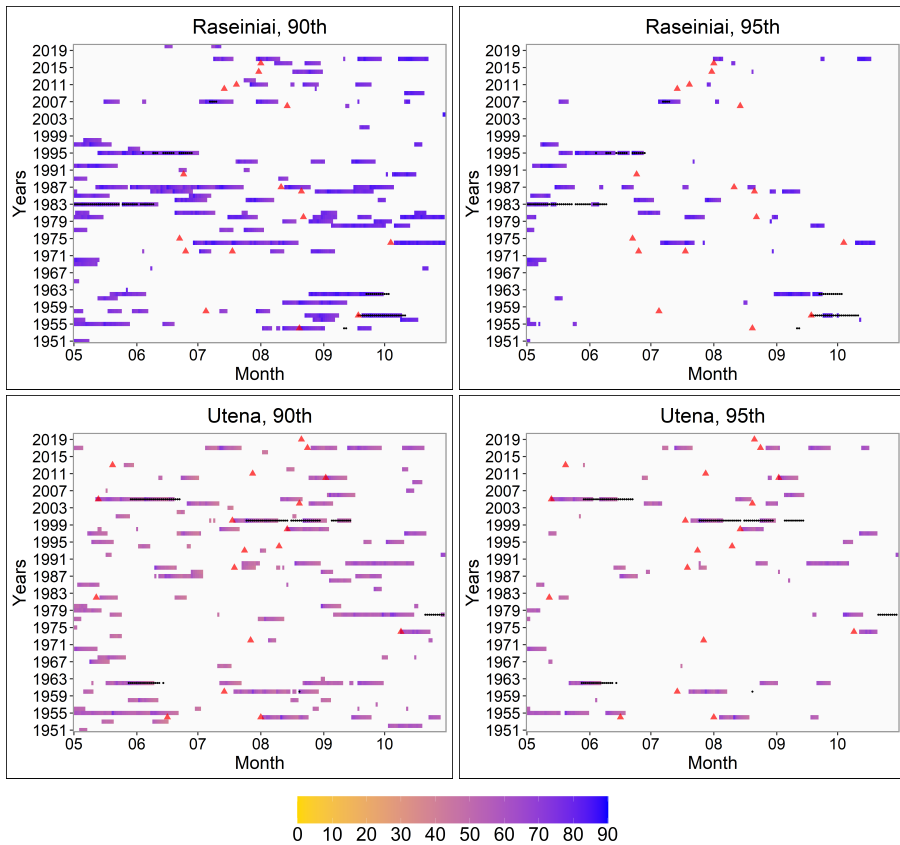


Figure 12. Soil moisture during wet periods (colour scale, mm). Wet periods are distinguished using the 90th (left) and 95th (right) percentiles of soil moisture values in loamy (Raseiniai) and sandy (Utena) soils. Long rainy periods are marked with black dots. Red triangles represent precipitation amount ≥ 40 mm per day.

The soil moisture values at the first day of wet periods had a strong, positive, and statistically significant relationship ($p < .05$) with amount of precipitation in the preceding 1–5 days ($r = 0.51–0.85$). Thus, the main increase in soil moisture is due to the impact of the last few days of rainfall (Figure 12). It may be questioned whether the nationally selected rainfall period of 60 days to identify a long rainy period isn't too long.

3.4 Agricultural Crop Productivity Under Extreme Soil Moisture Conditions

During the evaluation of standardized yield data for summer and winter grains and root vegetables (potatoes and sugar beets) the strong negative (≤ -1) and strong positive ($\geq +1$) yield anomalies were distinguished.

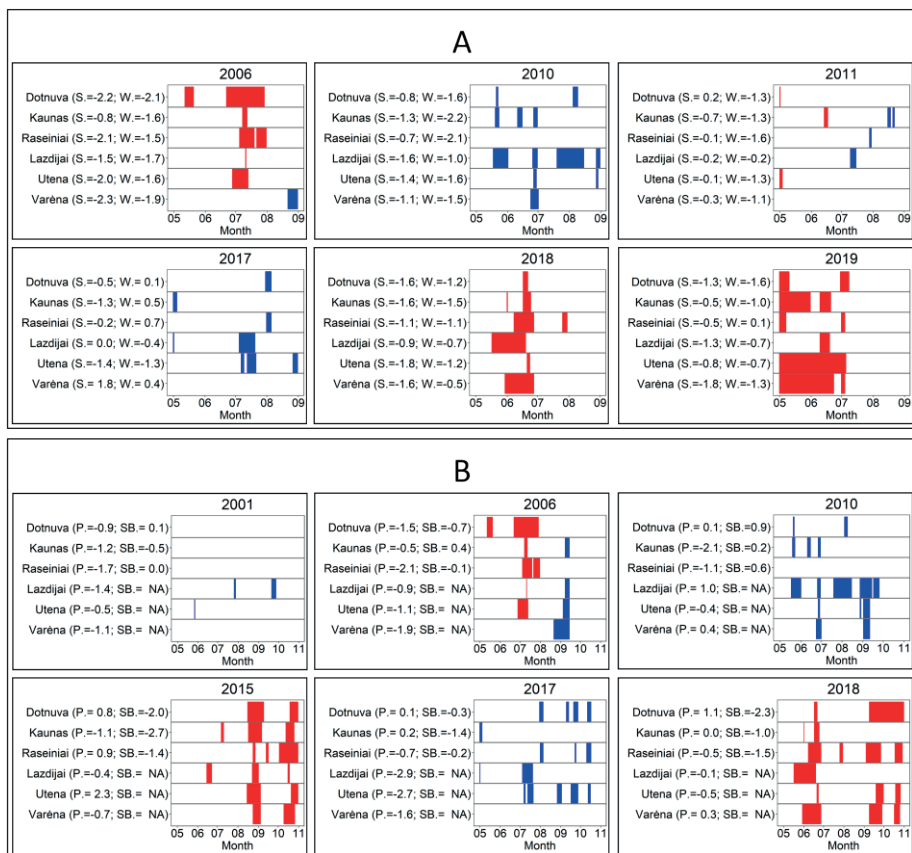


Figure 13. Dry periods (5th percentile, red) and wet periods (95th percentile, blue) in soil (0–20 cm) during years when strong negative yield anomalies for summer and winter cereals (A) and root vegetables (B) were recorded. Next to the station name is the standardized yield value for the municipality where the meteorological station is located. Abbreviations: summer (S.) and winter (W.) cereals, potatoes (P.), and sugar beet (SB.).

Of the 6 years when strong negative anomalies were recorded for cereals (2006, 2010, 2011, 2017, 2018, and 2019; Figure 13A) and root vegetables (2001, 2006, 2010, 2015, 2017, 2018; Figure 13B), five (in both cases) may be attributed to extreme dry or wet soil moisture conditions. In the remaining years, the anomalies may have reflected winter conditions, with cold weather and thin snow cover resulting in losses.

The impact of extreme conditions depended on their intensity, and time of occurrence relative to the vegetative phase of the plant. Majority of years with positive yield anomalies had no extreme soil moisture anomalies or the anomalies were determined when their impact was minimal; for example, dry soil during harvests could increase yields.

3.5 Comparison of Satellite and SWAP Model Soil Moisture Measurements

Copernicus SSM. The Pearson linear correlation coefficient r between SWAP model simulated soil moisture and Copernicus SSM (surface soil moisture) product values for May–October 2017–2020 ranged from 0.24 to 0.56 ($p < .05$; Figure 14). The weakest correlation was found in Varėna ($r = 0.24$). This was probably because a large part of the area is covered by forest; landscape heterogeneity can cause signal irregularities. The correlation in some stations was stronger in individual years ($r = 0.6–0.7$). These results are similar to comparative studies conducted in other European countries: $r = 0.30–0.55$, and up to 0.80 in some stations (Bauer-Marschallinger & Massart, 2022).

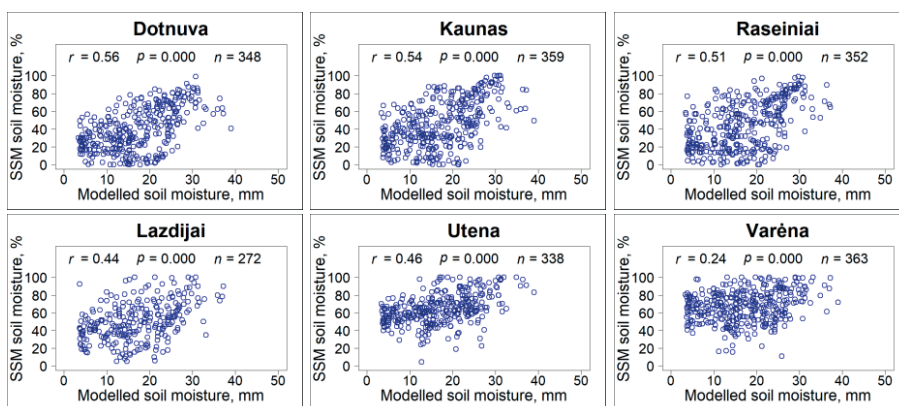


Figure 14. The relationship between SWAP model (x-axis, mm) and SSM satellite (y-axis, %) soil moisture in 2017–2020. r – Pearson's linear correlation coefficient, p – probability, n – number of data pairs.

ESA CCI SM. The correlation between SWAP model and ESA CCI SM soil moisture measurements during the period from 1979 and 2020 ranged from $r = 0.36$ to 0.58 ($p < .05$; Figure 15). Correlations were either stronger or weaker according to the year. When comparing 1979–2007 and 2008–2020 (when the amount of satellite information increased significantly), it was found that in most stations there was little change. Therefore, even with more information collected from different satellites, ESA CCI SM soil moisture product was not significantly closer to SWAP model values. Previous studies showed that ESA CCI SM soil moisture values were either well-correlated or poorly correlated with *in situ* data, but it was not possible to identify why (Hirschi et al., 2020). As a result, the quality of soil moisture data measured by satellite currently falls short of the SWAP model, thereby limiting their use.

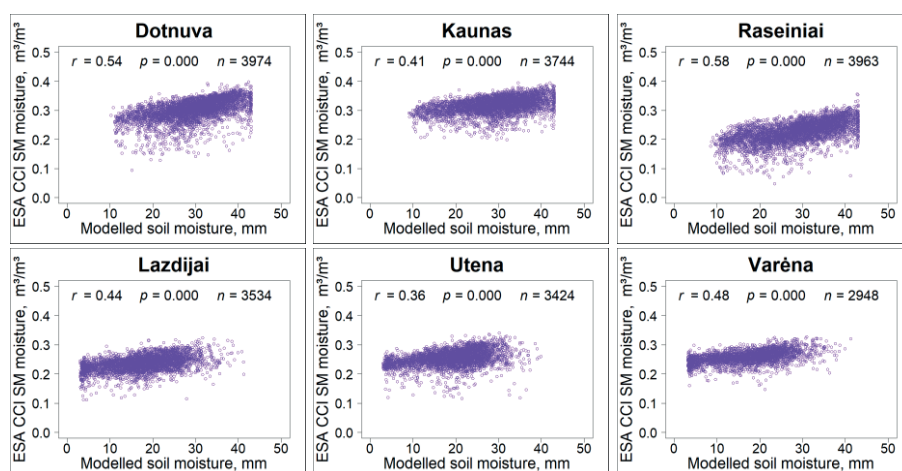


Figure 15. Relationship between SWAP model (x-axis, mm) and ESA CCI SM satellite (y-axis, m^3/m^3) soil moisture in 2017–2020. r – Pearson's linear correlation coefficient, p – probability, n – number of data pairs.

3.6 Predicted Changes in Soil Moisture in the 21st Century

Based on data from two climate models (MOHC and MPI) under two climate scenarios (moderate: RCP4.5; pessimistic: RCP8.5), the average air temperature during May–October at all stations is expected to have increased significantly by the end of the 21st century (compared with the 1970–2005 average) – to 1.5 – 2.9 °C according to RCP4.5 and 2.8 – 4.9 °C according to RCP8.5.

The predicted changes in seasonal precipitation are not as straightforward as temperature changes. Although the overall precipitation trend is usually

positive (according to RCP4.5 an increase up to 12%, and according to RCP8.5 an increase of up to 21% compared with 1970–2005 can be expected), changes can vary by month and in many cases are not statistically significant. Precipitation amount can decrease (up to 20%) or increase (up to 59%) in some months, what can lead to increasing extremity of soil moisture conditions.

Meanwhile, projected changes in soil moisture are even more uncertain because they depend on both air temperature and precipitation (Figure 16). The majority of projected changes are statistically insignificant, and the average seasonal soil moisture content may vary from -12% to +15%. The magnitude and sign of changes in individual months will depend on changes in air temperature and precipitation and how they relate to each other. There were no clear differences in predicted soil moisture values changes between loamy and sandy soils.

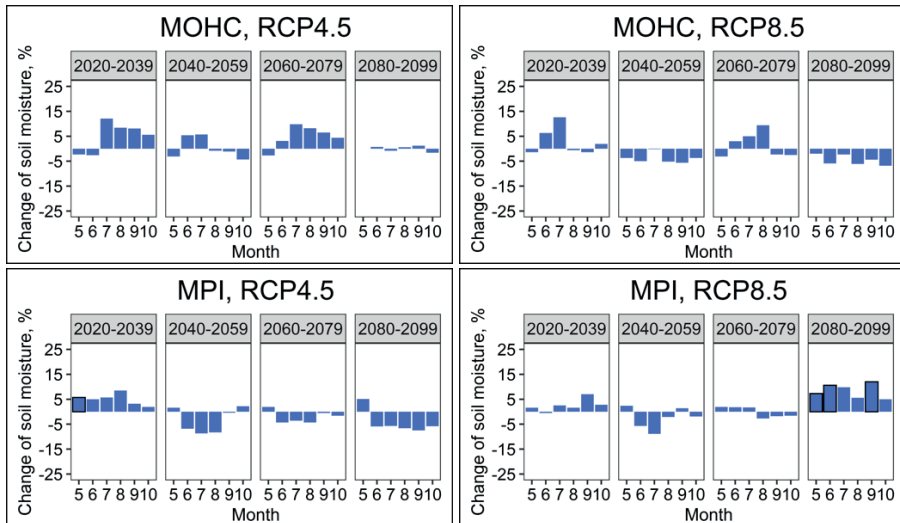


Figure 16. Projected changes (%) in average monthly soil moisture values up to the end of the 21st century in Kaunas (compared with the 1970–2005 average) according to MOHC and MPI models and RCP4.5 and RCP8.5 climate scenarios outputs. Statistically significant changes determined using the Mann–Whitney–Wilcoxon rank sum test ($p < .05$) are highlighted with a border.

Although seasonal precipitation may increase, which will lead to more frequent long rainy periods and wet periods, there may also be more droughts and dry periods due to the redistribution of precipitation within season (Figure 17).

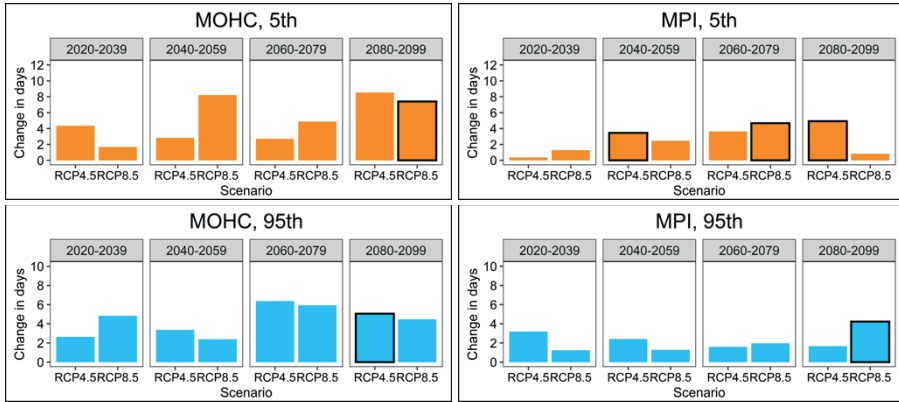


Figure 17. Changes in the number of days with dry periods (5th percentile) and wet periods (95th percentile) per decade in Kaunas (compared with the 1970–2005 average) for May–October. Statistically significant changes determined using the Mann–Whitney–Wilcoxon rank-sum criterion ($p < .05$) are highlighted with a border.

The number of TPI droughts and long rainy periods, as well as the recurrence and duration of dry and wet periods in the soil, have been found to increase in the future, although a large part of the projected changes are statistically insignificant.

CONCLUSIONS

1. As the outputs values of the SWAP model is close to the measured soil moisture ($r = 0.67–0.86$, $p < .05$), the model is suitable for moisture modelling in loamy and sandy soils. Despite some differences between modelled and measured values, the model responds well to short-term changes in air temperature and especially precipitation. Occasional larger differences between modelled and measured soil moisture values may also be due to inaccuracies in moisture measurements.
2. For the period 1951–2020, it was found that the average monthly soil moisture at the beginning of the growing season (May and June) decreased (up to 18%) and increased in July. This change in soil moisture is partly in line with changes and the redistribution of precipitation during the warm season.
3. Throughout the season, soil moisture values are mainly predetermined by the relationship between the previous 20–30 days air temperature and precipitation ($r = 0.67–0.72$, $p < .05$). In mid-season (July, August),

the amount of precipitation becomes almost as important ($r = 0.79\text{--}0.81$, $p < .05$), while air temperature is less important in all months. The effect of heavy rainfall and precipitation-free periods on soil moisture depends on the previous amount of moisture. Loamy soils have a greater increase rate in soil moisture than sandy soils with the same amount of precipitation, while periods without precipitation reduce soil moisture more rapidly in sandy soils.

4. The soil moisture values simulated by the SWAP model can be used to distinguish dry and wet periods in the soil. 74% of officially declared severe droughts and 87% of long rainy periods were identified by soil moisture. Soil moisture at the beginning of dry periods is most strongly correlated with the average air temperature of the preceding 20–40 days ($r = -0.84\text{--}0.95$, $p < .05$), while at the beginning of wet periods it is most strongly correlated with the precipitation sum of the preceding 1–5 days ($r = 0.53\text{--}0.81$, $p < .05$).
5. The study found that more than 80% of the cases of very strong negative anomalies in annual yields of cereals and root vegetables between 2000 and 2020 could be attributed to extremely dry or wet soil conditions. In the remaining years, the anomalies may have been caused by unfavourable conditions during the preceding winter.
6. The satellite-based soil moisture values are quite different from measurements or SWAP model simulations. The correlation between SWAP model soil moisture and the data of two satellite products was found to be weak, although in some years the correlation coefficient may be as high as 0.7. So far, the satellite soil moisture products are inferior in reliability to the modelling results.
7. An assessment of changes in soil moisture conditions up to the end of the 21st century shows that soil moisture is likely to increase when precipitation is projected to increase. However, rising temperatures may reduce the impact of increasing precipitation, therefore the overall impact of changes of meteorological conditions on average soil moisture values will not be very strong. The extremity of meteorological and soil moisture conditions will increase in all analysed cases due to rising temperatures and the intra-seasonal redistribution of precipitation, with an increase in the number of days of both droughts and long rainy periods as well as dry and wet periods in the soil.

CURRICULUM VITAE

Disertacijos darbo autorė Viktorija Mačiulytė gimė 1992 metų rugsėjo 16 dieną. 2011 metais baigė Utenos Šapokos gimnaziją ir tais pačiais metais įstojo į Vilniaus universiteto Gamtos mokslų fakulteto (dabartinio Chemijos ir geomokslų fakulteto Geomokslų instituto) Hidrologijos ir klimatologijos katedros *meteorologijos ir hidrologijos* bakalauro programą. Bakalauro studijas baigė 2015 metais apgynusi baigiamąjį darbą „Dirvožemio temperatūros analizė įvairiuose gyliuose Lietuvoje“. Mokymąsi tęsė tame pačiame padalinyje *hidrometeorologijos* magistrantūros studijų programoje. 2017 metais apgynė magistro darbą „Augalų vegetacijos būklė rytinėje Baltijos regiono dalyje“. Baigusi magistrantūrą, 2017 metais įstojo į *gamtos mokslų srities fizinės geografijos mokslo krypties* doktorantūros studijas tame pačiame padalinyje.

PADĖKA

Norėčiau išreikšti savo nuoširdžiausią padėką visiems, kurie padėjo man rengiant šią disertaciją.

Pirmiausia dėkoju savo darbo vadovui prof. dr. Egidijui Rimkui, su kuriuo mokslinė kelionė trunka jau daugiau nei dešimtmetį. Šis mokslinis bendradarbiavimas apima bene trečdalį mano gyvenimo laiko, todėl prof. dr. Egidijaus Rimkaus indėlis į mano, kaip mokslininkės, formavimąsi yra milžiniškas. Dėkoju už pastangas, pasitikėjimą ir gebėjimą sunkiais mokslinio tyrimo momentais palaikyti, o lengvais – skatinti judėti toliau. Taip pat nedera pamiršti nuolatinų konsultacijų ir diskusijų moksliniais klausimais, didžiulio indėlio atliekant šios disertacijos tyrimus ir ją rengiant.

Taip pat dėkoju konsultantui prof. dr. Edvinui Stonevičiui už pagalbą ir paramą rengiant šį darbą. Ypatingai esu dėkinga ne tik už metodinę, bet ir pagalbą sprendžiant techninius klausimus, kurie padėjo palengvinti šio tyrimo vystymą ir pagerinti galutinį rezultatą.

Doc. dr. Jonui Volungevičiui dėkoju už konsultacijas dirvožemių klausimais, o Jolitai Stankūnavičienei – už disertacijos kalbos redagavimą.

Esu dėkinga Lietuvos hidrometeorologijos tarnybos kolektyvui ir ypatingai savo skyriaus kolegoms – dr. Donatui Valiukui ir Zinai Kitrienei už konsultacijas ir begalinį moralinį palaikymą. Būti šio kolektyvo dalimi yra didžiulis džiaugsmas.

Be to, norėčiau padėkoti savo šeimos nariams ir artimiesiems už nuolatinį palaikymą, supratimą ir kantrybę. Jie buvo man didelis moralinis ir emocinis ramstis šioje mokslinėje kelionėje.

Galiausiai, norėčiau padėkoti visam Hidrologijos ir klimatologijos katedros kolektyvui, apgaubusiam mane bendruomeniškumu, draugiškumu ir parama. Labai džiaugiuosi būdama ir šio kolektyvo dalimi.

PUBLIKACIJŲ SĄRAŠAS

Pagrindiniai darbo rezultatai buvo publikuoti keturiuose straipsniuose duomenų bazėje *Clarivate Analytics Web of Science* (CA WOS) ir konferencijų medžiagoje.

CA WOS

1. Dyrddal, A. V., Olsson, J., Médus, E., Arnbjerg-Nielsen, K., Post, P., Aņiskeviča, S., Thorndahl, S., Førland, E., Wern, L., **Mačiulytė, V.**, & Mäkelä, A. (2021). Observed changes in heavy daily precipitation over the Nordic-Baltic region. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 38, 100965. ISSN 2214-5818. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100965>
2. **Mačiulytė, V.**, Rimkus, E., Stonevičius, E., & Valiukas, D. (2022). Long-term precipitation events in the eastern part of the Baltic Sea region. *Oceanologia*, 65(1), 141–150. ISSN 0078-3234. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2022.02.003>
3. Olsson, J., Dyrddal, A. V., Médus, E., Södling, J., Aņiskeviča, S., Arnbjerg-Nielsen, K., Førland, E., **Mačiulytė, V.**, Mäkelä, A., Post, P., Thorndahl, S. L., & Wern L. (2022). Sub-daily rainfall extremes in the Nordic–Baltic region. *Hydrology Research*, 53(6), 807–824. ISSN 0029-1277. <https://doi.org/10.2166/nh.2022.119>
4. Rimkus, E., **Mačiulytė, V.**, Stonevičius, E., & Valiukas, D. (2020). A revised agricultural drought index in Lithuania. *Agricultural and Food Science*, 29(4), 359–371. ISSN 1795-1895. <https://doi.org/10.23986/afsci.92150>

Konferencijų medžiaga

1. **Mačiulytė, V.** (2018). Relationship between satellite measured soil moisture and meteorological parameters. In *2nd Baltic Earth Conference "The Baltic Sea in Transition" Conference Proceedings*, 13, 159–160. ISSN 2198-4247. International Baltic Earth Secretariat Publication.
2. **Mačiulytė, V.**, & Rimkus, E. (2022). Model-based soil moisture during droughts in Lithuania. In *4th Baltic Earth Conference "Assessing the Baltic Sea Earth System" Conference Proceedings*, 21, 81–82. ISSN 2198-4247. International Baltic Earth Secretariat Publication.
3. **Mačiulytė, V.**, & Stankūnavičius, G. (2020). Agrothermal changes in 1961–2018 in Lithuania. In *3rd Baltic Earth Conference "Earth system changes and Baltic Sea coasts" Conference Proceedings*, 18, 72–73. ISSN 2198-4247. International Baltic Earth Secretariat Publication.

4. Rimkus, E., Stonevičius, E., Valiukas, D., & **Mačiulytė, V.** (2020). Definition of droughts and their recurrence in Lithuania. In *3rd Baltic Earth Conference "Earth system changes and Baltic Sea coasts" Conference Proceedings*, 18, 85–86. ISSN 2198-4247. International Baltic Earth Secretariat Publication.

Vilniaus universiteto leidykla
Saulėtekio al. 9, III rūmai, LT-10222 Vilnius
El. p. info@leidykla.vu.lt, www.leidykla.vu.lt
bookshop.vu.lt, journals.vu.lt
Tiražas 25 egz.