

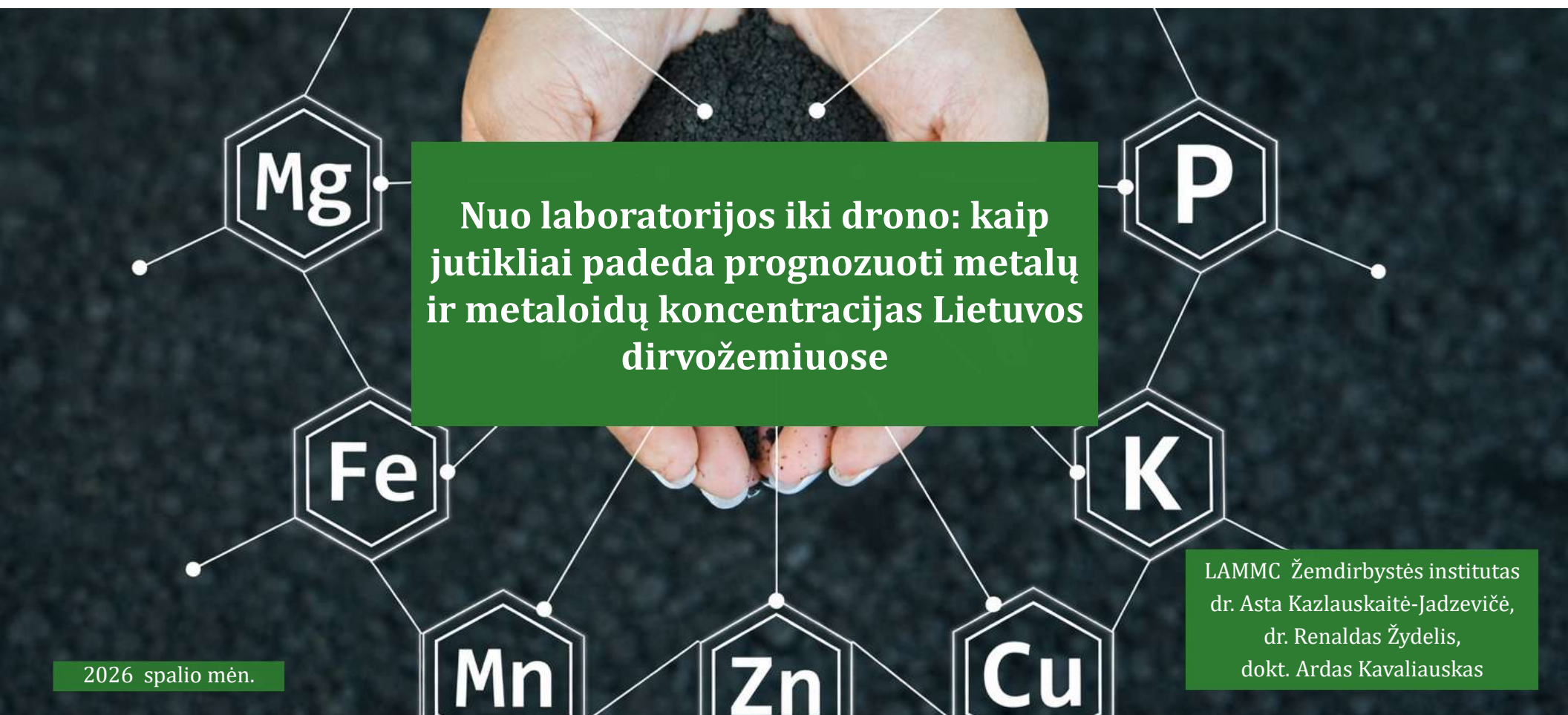


LIETUVOS
AGRARINIŲ IR MIŠKŲ
MOKSLŲ CENTRAS

Finansuoja Lietuvos mokslo taryba (LMT)
Projektas AgroSens, Nr. S-MIP-24-106; Nr. S-SV-25-214



LMT
Lietuvos mokslo taryba

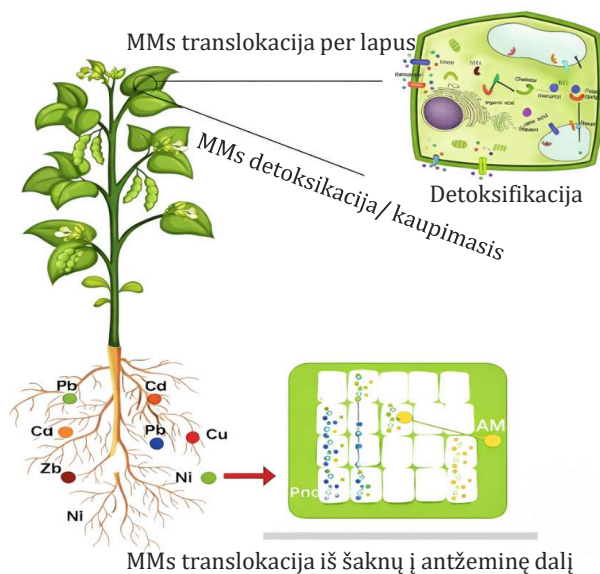


Nuo laboratorijos iki drono: kaip
jutikliai padeda prognozuoti metalų
ir metaloidų koncentracijas Lietuvos
dirvožemiuose

LAMMC Žemdirbystės institutas
dr. Asta Kazlauskaitė-Jadzevičė,
dr. Renaldas Žydelis,
dakt. Ardas Kavaliauskas

2026 spalio mėn.

TYRIMO AKTUALUMAS



Dirvožemis yra pagrindinė terpė, kurioje akumuliuojasi metal(oid)ai (MMs). Nors dirvožemis atlieka kritines funkcijas reguliuojant maistinių medžiagų apykaitą, jis taip pat veikia kaip ilgalaikis teršalų „rezervuaras“. Tokie elementai kaip **Pb, Cd, As, Ni, Cu, Zn, Cr ir Co** gali pasižymėti toksiškumu ir gebėjimu migruoti iš dirvos į augalus, taip sukeldami tiesioginį pavojų maisto saugai ir žmonių sveikatai. Pagrindiniai dirvožemio rodikliai, tokie kaip organinė anglis (SOC), pH, dirvožemio drėgnis ir tekstūra, yra kritiniai, nes jie tiesiogiai lemia metal(oid)ų **bioprieinamumą** ir mobilumą maisto grandinėje.

2025 m. priimta ES Dirvožemio stebėsenos direktyva įpareigoja šalis stebėti dirvožemio užterštumą.

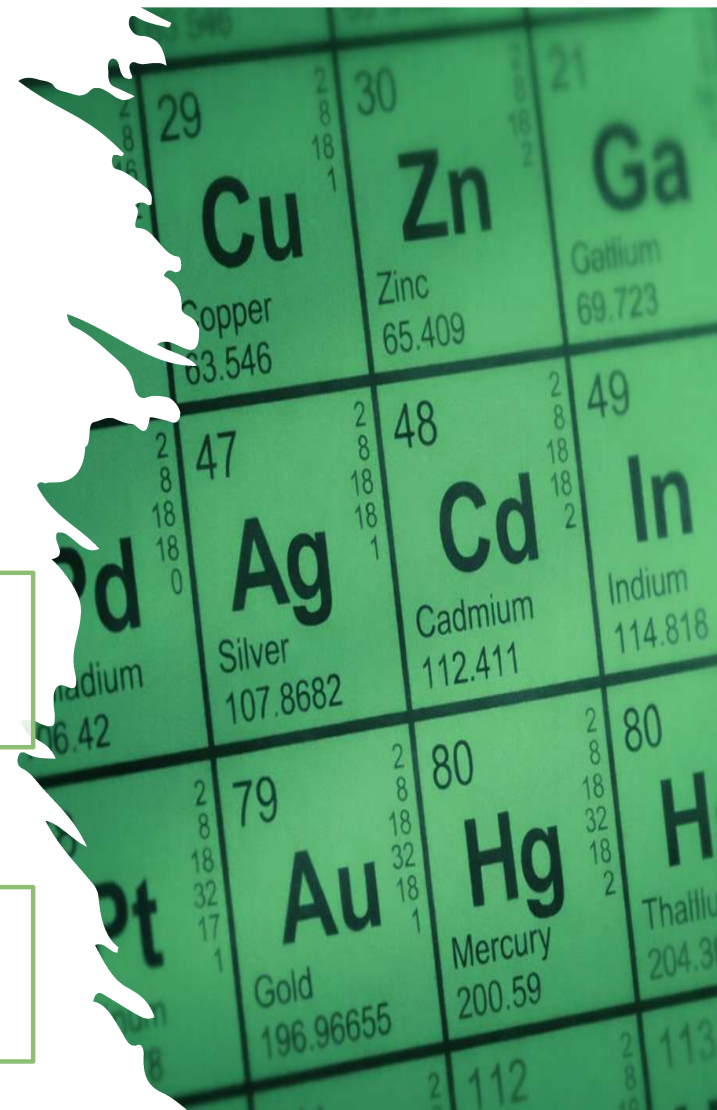
1 Pav. metal(oid)ų pasisavinimas ir translokacija augaluose per lapų ir šaknų sistemas (pagal Mohamed et al., 2025)

Kas tai yra meta(loid)ai?

Metalai – elementai, kurie lengvai atiduoda elektronus ir sudaro katijonus. Metaloidai (pvz., arsenas) – elementai, kurių savybės tarpinės tarp metalų ir nemetalų. Dirvožemyje jie nesuyra, tik keičia chemines formas, todėl ilgai išlieka aplinkoje.

Būtinieji mikroelementai: Fe, Zn, Cu, Mn, Mo, Ni, Co. Mažais kiekiais reikalingi fermentų veiklai.

Toksiški metalai: Hg, Pb, Cd, As, Cr. Neturi jokios teigiamos biologinės funkcijos ir yra nuodingi.



Kontrolės taškas	Matuojame	Tikslas	Normos
<u>DIRVOŽEMIS</u>	<u>MMs kiekis dirvožemyje</u>	<u>Dirvožemio būklė</u>	Ar neviršyta pagal HN 60:2015?
AUGALAS	Augimo tempas, spalva ir kt.	Augalo sveikata	Ar neviršyta pagal mokslinius tyrimus?
MAISTAS	MMs kiekis augaliniame maiste	Žmogaus sauga	Ar neviršyta pagal ES 2023/915?

Būtinieji metalai (Mikroelementai)

Toksiški (nereikalingi)

1 lentelė.

Metalas	Norma augale (mg/kg)	Toksiška augale (mg/kg)	Pagrindinis toksiškumo poveikis
Varis (Cu)	5–20	> 20–30	Šaknų augimo slopinimas, chlorozė (dėl Fe blokavimo), oksidacinis stresas.
Cinkas (Zn)	25–150	> 300–500	Mažėjantys lapai, sutrumpėję tarpubambliai, antrinis Mg ir Fe trūkumas.
Arsenas (As)	< 0,1–1,0	> 2–5	Šaknų nekrozė, sutrikusi ATP sintezė, augalo vytimas (vandens apytakos sutrikimas).
Chromas (Cr)	< 0,1–0,5	> 1–2	Prastas dygimas, mažas šaknų biomasės kiekis, sutrikęs maisto medžiagų transportas.
Kadmis (Cd)	< 0,05–0,2	> 5–10	Fotosintezės slopinimas, lapų pageltimas (chlorozė), DNR pažeidos.
Nikelis (Ni)	0,1–5	> 10–50	Nekrozės dėmės lapų kraštuose, prastesnė grūdų kokybė; hiperakumulatoriai (Alyssum) toleruoja > 1000 mg/kg.
Kobaltas (Co)	0,02–0,5	> 15–50	Lapų blyškumas, sumažėjęs azoto fiksavimas (ankštiniam), ūglių augimo lėtėjimas.
Švinas (Pb)	< 0,1–5	> 10–30	Fotosintezės fermentų blokavimas, juoduojančios šaknys, ląstelių dalijimosi stabdymas.

Didžiausios leidžiamos koncentracijos dirvožemyje

2 lentelė.

<u>Metalas</u>	<u>DLK, HN 60:2015</u> (mg/kg)
Kadmis (Cd)	1,5
Švinas (Pb)	80
Arsenas (As)	20
Chromas (Cr)	80
Nikelis (Ni)	75
Varis (Cu)	75
Cinkas (Zn)	300
Kobaltas (Co)	40

Kodėl šie skaičiai kinta?

Metalo „nuodingumas“ priklauso ne tik nuo jo kiekio...

3 lentelė.

Metai (Cd, Pb, Cu, Ni, Hg, As) veikia augalus: stabdo augimą, mažina fotosintezę, blogina derliaus kokybę.

MMs biologinį prieinamumą lemia:

Dirvožemio pH: rūgštus dirvožemis (mažas pH) „išlaisvina“ metalus, jie ištirpsta ir augalai juos pasisavina daug lengviau, todėl jie tampa toksiški net prie mažesnių koncentracijų.

Dirvožemio tekstūra: Jei dirvožemyje daug molio ar organinių medžiagų, jie „suriša“ metalus, neleisdami jiems patekti į augalą.

Humuso kiekis: daugiau humuso = mažesnė rizika

Augalo rūšis: pavyzdžiui, **hiperakumulatoriai** *Alyssum* genties augalai gali sukaupti net **30,000 mg/kg** (iki 3 %) nikelio savo ląstelių vakuolėse, todėl jis jiems nekenkia, tuo tarpu kiti augalai žūtų esant vos 100 mg/kg.

Augalai labiau kaupiantys MMs - špinatai, morkos, rapsai.

•**Integruotas požiūris:** UAV multispektriniai vaizdai derinami su išmatuotomis dirvožemio savybėmis ir Random Forest modeliais.

•**Lauko mastelis:** 2,6 cm rezoliucijos UAV vaizdai ir tankus mėginių tinklas (3–10 mėg./ha) penkiuose skirtingų dirvožemių laukuose.

•**Kritinis vertinimas:** 14 kintamųjų scenarijų, jungtiniai ir atskirų laukų modeliai – įvertinama, kiek tikslumo lemia skirtumai tarp laukų, o kiek – lauko vidaus kintamumas.

TYRIMO NAUJUMAS

Nacionaliniai MMs žemėlapiai Lietuvoje neatnaujinti apie pora dešimtmečių, o MMs kintamumas lauko viduje Šiaurės-Baltijos regiono žemės ūkio dirvožemiuose beveik netirtas. Šiame tyrime pirmą kartą Lietuvoje MMs prognozavimui derinami UAV duomenys, dirvožemio savybės ir RF algoritmas.

TYRIMO TIKSLAS

Įvertinti, ar UAV multispektrinių vaizdų derinimas su išmatuotomis dirvožemio savybėmis leidžia patikimai prognozuoti aštuonių MMs (As, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) koncentracijas žemės ūkio dirvožemiuose ir sudaryti jų pasiskirstymo lauke žemėlapius.

UŽDAVINIAI

1

įvertinti 8 MMs koncentracijas ir jų kintamumą penkiuose skirtingų dirvožemių laukuose;

2

įvertinti UAV duomenų ir dirvožemio savybių indėlį Random Forest prognozėms, lyginant jungtinius ir atskirų laukų modelius;

3

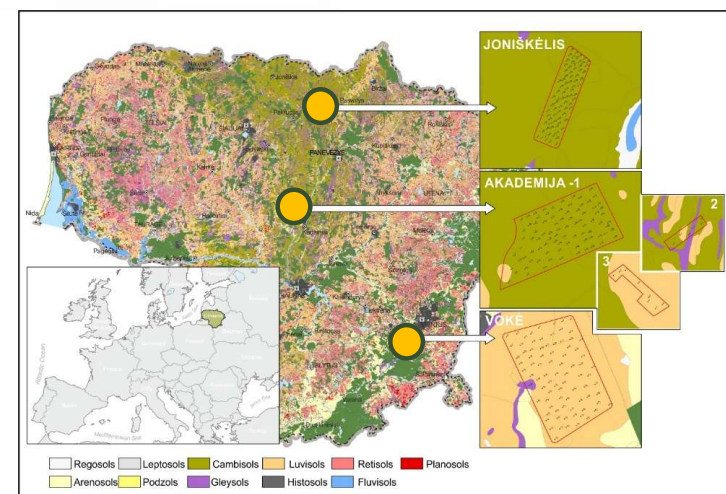
sudaryti MMs pasiskirstymo lauke žemėlapius ir palyginti juos su išmatuotų koncentracijų žemėlapiais.



2 Pav. Tyrimo laukai ir mėginių ėmimo taškai

TYRIMŲ VIETA

Penki žemės ūkio laukai skirtingose Lietuvos agroklimatinėse zonose: Akademija 1–3 (Vidurio Lietuva), Joniškėlis (Šiaurės Lietuva) ir Vokė (Pietryčių Lietuva). Laukų plotas 1,6–25,3 ha. 2024–2025 m., esant plikai dirvai, paimti 263 dirvožemio ėminiai (0–20 cm); taškai parinkti stratifikuotai pagal nuotolinių vaizdų heterogeniškumą (3,0–9,6 mėg./ha). Dirvožemiai – Cambisol, Luvisol, Gleysol, Arenosol; nuo priesmėlio (Vokė) iki molingo priemolio (Joniškėlis).



3 Pav. Tyrimo vietų geografinė padėtis

TYRIMŲ METODAI

UAV duomenys

Multispektrinis dronas DJI Mavic 3 : žalias (560 nm), raudonas (650 nm), raudonasis kraštas (*red edge*, 730 nm) ir artimasis infraraudonasis (*NIR*, 860 nm) spektriniai kanalai.

Skrydis 50 m aukštyje ėminių ėmimo dieną, plika dirva; viso lauko vaizdo rezoliucija – 2,6 cm

Laboratoriniai tyrimai

MMs: karališkasis vanduo, spektrometrinis matavimas.

Cheminės savybės: SOC (Tiurino m.), bendrasis N (Kjeldalio m.), C/N, pH(KCl).

Fizinės savybės: granulimetrinė sudėtis (ISO 11277), tankis (ISO 11272), tūrinė drėgmė.

Struktūra: agregatų frakcijos (sausas sijojimas), vandeniui atsparūs agregatai (šlapias sijojimas).

MODELIAVIMAS



SCENARIJAI

4 lentelė.

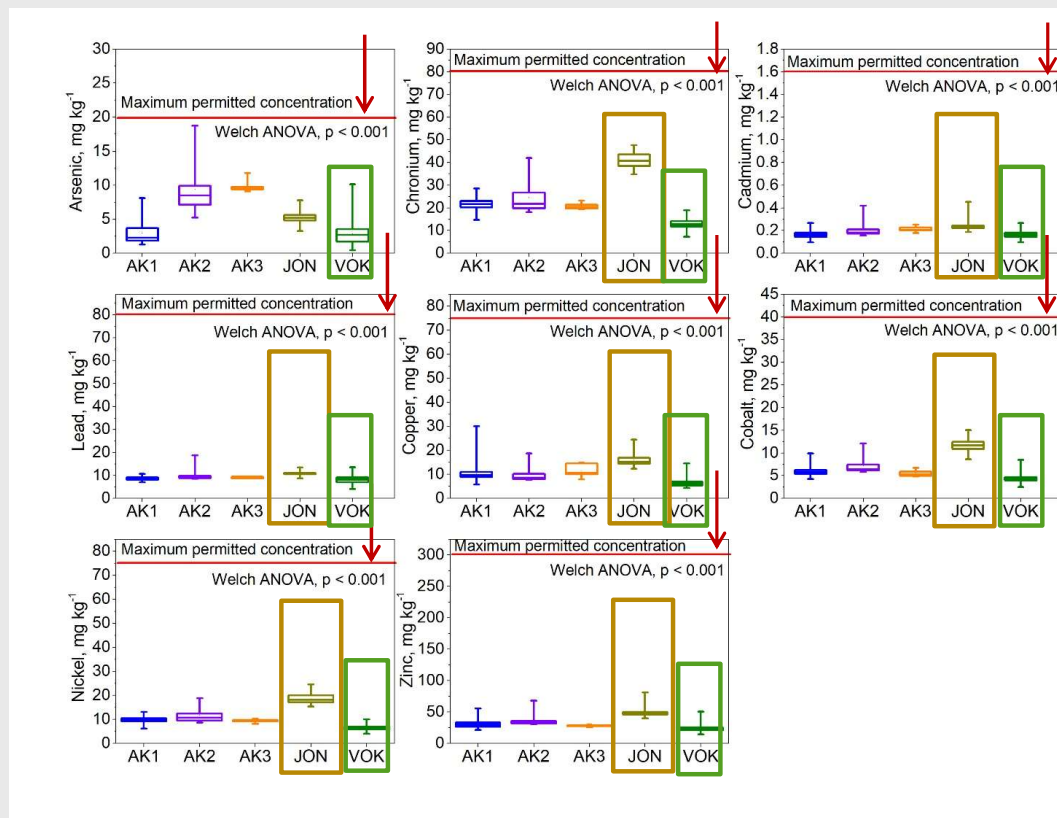
Scenarijus	UAV	Tekstūra	Agregatai	Drėgmė	Tankis	Cheminės*
A1	●					
A2	●	●				
A3	●		●			
A4	●			●		
A5	●	●	●			
A6	●	●		●		
A7	●	●	●	●		
B1	●					●
B2	●	●		●	●	
B3	●	●		●	●	●
B4	●		●			●
B5	●	●	●	●	●	
B6	●	●	●	●	●	●
B7		●	●	●	●	●

* SOC, bendrasis N, C/N, pH. A grupė – kovariantai parinkti pagal PCA; B grupė – įprastinės savybių grupės.
Paryškinti: A1 (tik UAV), B6 (visi), B7 (be UAV).

REZULTATAI (1)

koncentracijos

- Visų MMs koncentracijos gerokai žemiau DLK
- Laukai reikšmingai skiriasi (Welch ANOVA, $p < 0,001$)
- Joniškėlis (molingas) – didžiausi Cr, Ni, Co, Zn, Cu; Vokė (smėlinga) – mažiausi



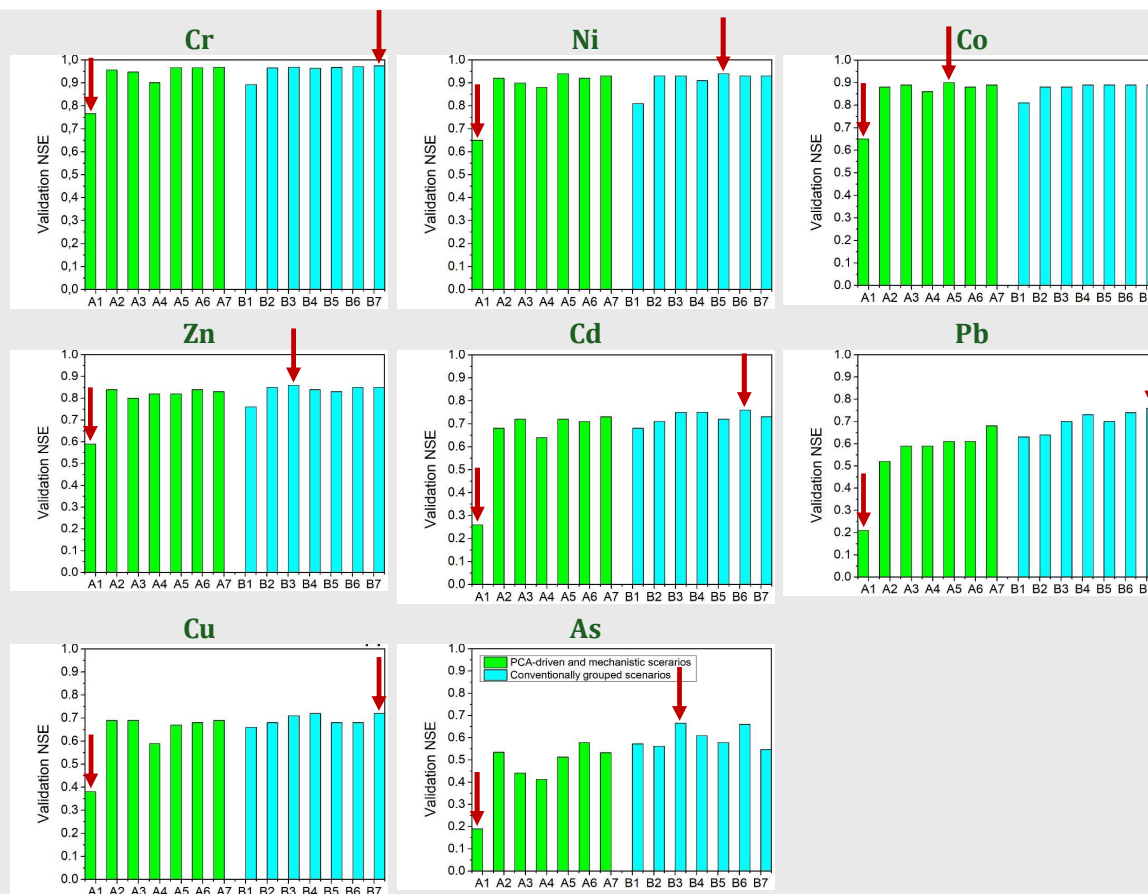
4 Pav. MMs koncentracijos tirtuose laukuose ir DLK (HN 60:2015)

REZULTATAI (2)

jungtiniai modeliai

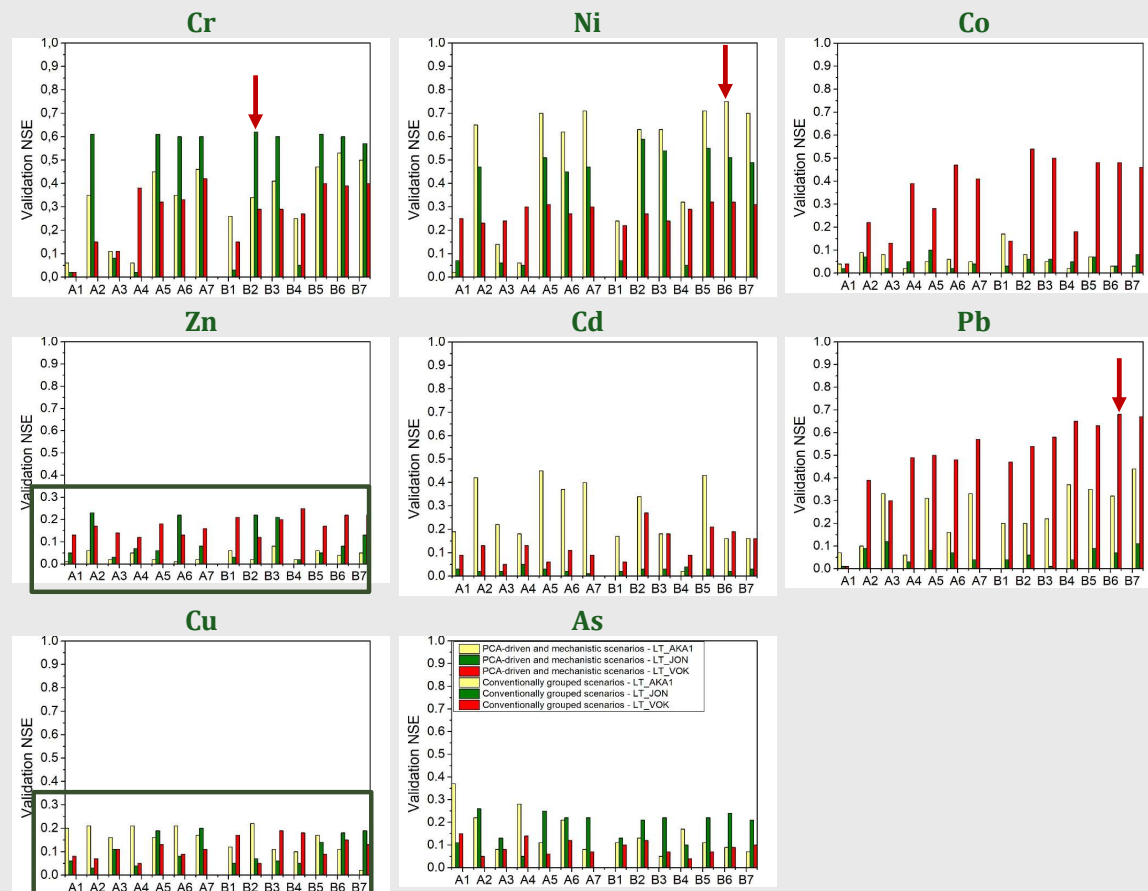
- Tik UAV (A1) – silpniausias visiems elementams (NSE 0,19–0,77)
- Su dirvožemio savybėmis – NSE 0,67–0,97
- Skirtumai tarp geriausių scenarijų nedideli
- Pb ir Cr – tiksliausias modelis be UAV (B7)

NSE = 1: prognozė tobula, sutampa su išmatuotomis vertėmis



5 Pav. Jungtinių modelių prognozės tikslumas (NSE) visuose 14 scenarijų (žalia – A grupė, žydra – B grupė)

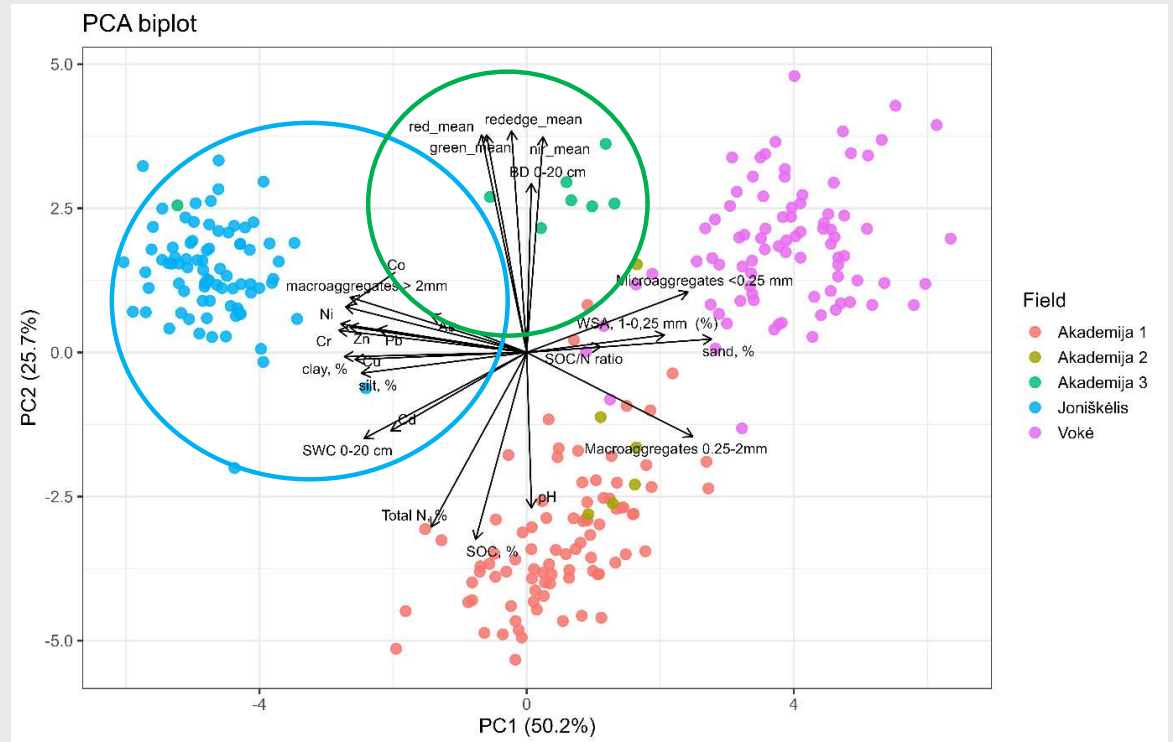
- Atskirų laukų modeliai silpnesni ($NSE \leq 0,75$)
- Geriausi: Ni Akademijoje 1 (0,75; UAV + visos dirvožemio savybės), Pb Vokėje (0,68; UAV + visos dirvožemio savybės), Cr Joniškėlyje (iki 0,62; UAV + granulimetrinė sudėtis)
- Cu ir Zn – silpnai visuose laukuose ($NSE \leq 0,25$)



6 Pav. Atskirų laukų modelių prognozės tikslumas (NSE): šviesiai geltona – Akademija 1, žalia – Joniškėlis, raudona – Vokė

REZULTATAI (4) *pagrindinių komponenčių analizė (PCA)*

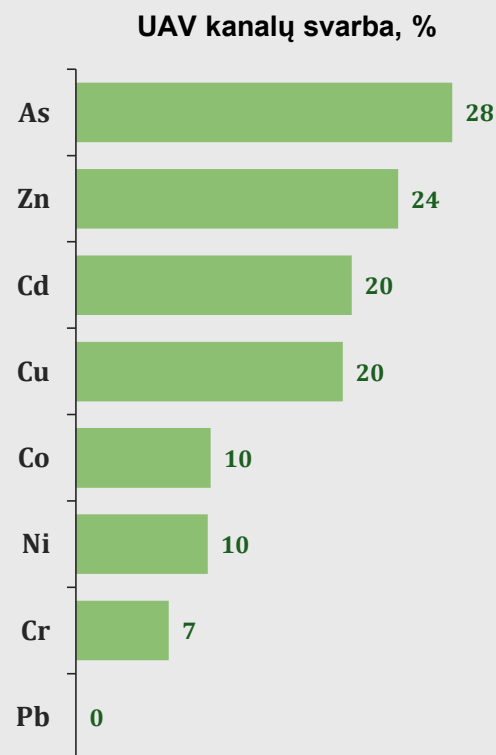
- Kur daugiau molio, ten daugiau metalų (Cr, Ni, Co, Zn, Cu)
- Drono kanalai daugiausia atspindi dirvos šviesumą (organinę anglį), ne metalus
- Todėl modeliuose svarbiausios dirvožemio savybės, o drono indėlis 7–28 %



7 Pav. PCA: MMs, dirvožemio savybės ir UAV kanalai

REZULTATAI (5) *kintamųjų svarba*

- Visuose modeliuose svarbiausios – dirvožemio savybės
- UAV kanalų dalis 7–28 %; didžiausia As
- Tekstūra ir agregatai – Cr, Ni, Co, Zn, Cu



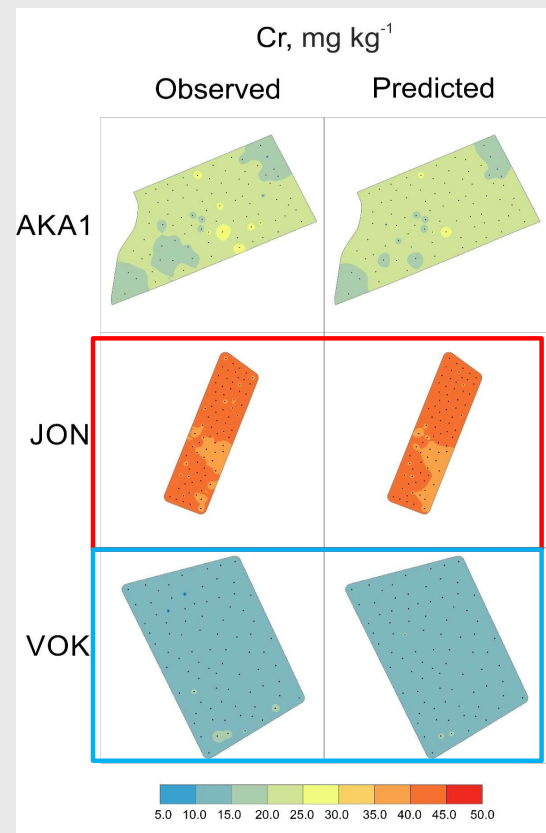
MMs	Svarbiausi kintamieji
As	molis, bendrasis N, C/N
Zn	smėlis, molis, dulkės
Cd	SOC, smėlis
Cu	mikro- ir makroagregatai
Co	makroagregatai, molis
Ni	mikroagregatai, smėlis
Cr	smėlis, molis, mikroagregatai
Pb	drėgmė, molis, pH (be UAV)

8 Pav. UAV duomenų svarba modeliuose ir svarbiausi dirvožemio rodikliai

REZULTATAI (6)

žemėlapiai

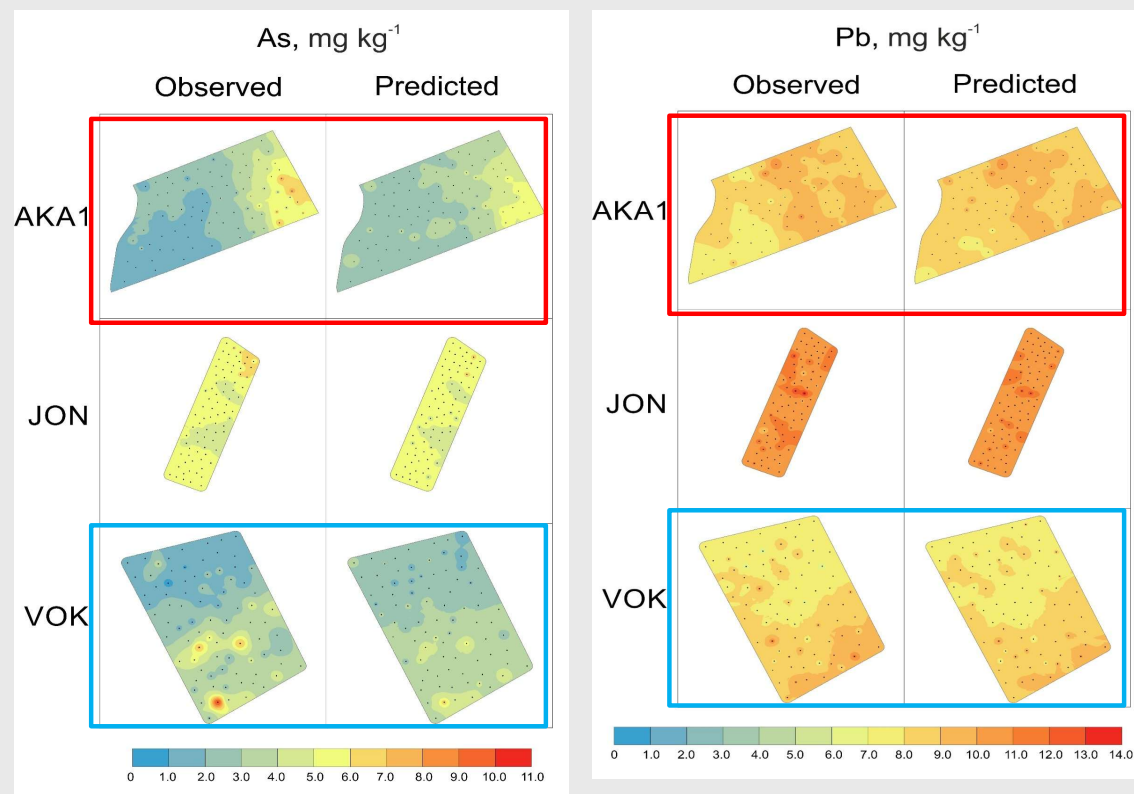
- Prognozė atkartoja pagrindinius skirtumus: daug Cr Joniškėlyje, mažai Vokėje
- Pavienės didžiausios vertės prognozėje sušvelnintos
- Žemėlapis tikslus tiek, kiek tankiai paimti mėginiai



9 Pav. Išmatuotos (kairėje) ir prognozuotos (dešinėje) Cr koncentracijos

REZULTATAI (7) *žemėlapiai*

- As – prognozė atkartoja kiekio didėjimą Akademijos lauke, bet pavienės didelės vertės Vokėje sušvelnintos
- Pb – prognozė ir matavimai sutampa Akademijoje ir Vokėje
- Žemėlapiai tinka papildomo mėginių ėmimo vietoms parinkti



10 Pav. Išmatuotos ir prognozuotos As (kairėje) ir Pb (dešinėje) koncentracijos

APIBENDRINIMAS



- Metal(oid)ų koncentracijos neviršija DLK, tačiau tarp laukų reikšmingai skiriasi.
- Tiksliausiai prognozuojami Cr, Ni, Co ir Zn (NSE 0,86–0,97), Cd ir Pb rezultatai buvo vidutiniai (0,76), silpniausiai – Cu ir As (0,72 ir 0,67), nes tikslumas priklauso nuo ryšio su dirvožemio savybėmis, ypač granuliometrine sudėtimi.
- Skirtumus tarp laukų modelis prognozuoja gerai, o lauko viduje – silpniau, nes ten koncentracijos kinta mažai.
- Žemėlapiai tinka mėginių ėmimo vietoms parinkti, bet matavimų nepakeičia.



LIETUVOS
AGRARINIŲ IR MIŠKŲ
MOKSLŲ CENTRAS



LMT

Lietuvos mokslo taryba

Tyrimą finansavo Lietuvos mokslo taryba (LMT)
Projektas AgroSens (Nr. S-MIP-24-106) ir Nr. S-SV-25-214

Padėka magistratūros studentei Brigitai Senkienei paruošiant
dirvožemio mėginius metal(loid)ų analizei.

Ačiū už dėmesį

