

OCENA VEZAVE ORGANSKEGA OGLJIKA V TLA KMETIJSKIH ZEMLJIŠČ SLOVENIJE

Janez Bergant, Peter Kastelic

Kmetijski inštitut Slovenije

peter.kastelic@kis.si

jani.bergant@kis.si

dr. Borut Vrščaj

Kmetijski inštitut Slovenije in Fakulteta za varstvo okolja

borut.vrscaj@kis.si, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0850-7220>

DOI: https://doi.org/10.3986/9789610506683_05

UDK: 546.26:631(497.4)

IZVLEČEK

Ocena vezave organskega ogljika v tla kmetijskih zemljišč Slovenije

V študiji smo izdelali oceno vezave organskega ogljika (OC) za kmetijska tla Slovenije za obdobje 2020–2040. Uporabili smo model Rothamsted carbon (RothC), ki ga za oceno vezave OC uporablja FAO, in ga prilagodili tako, da smo uporabili nacionalne podatke, ki so praviloma večje prostorske in vsebinske natančnosti, kot podatki zbrani na svetovni ravni. Rezultat so prostorski rastrski sloji absolutne povprečne letne stopnje vezave OC, povprečne relativne stopnje vezave OC ter ocene negotovosti za obdobje 20 let (tOC/ha na leto) za štiri scenarije obdelave tal: a) obdelava tal brez sprememb in prilagoditev ter b) za tri stopnje prilagojene trajnostne obdelave tal. Ocene količin vezave OC v tla bodo omogočile vrednotenje bilance OC v kmetijskih zemljiščih (vir/ponori) in predvsem boljše vsebinsko in prostorsko utemeljeno usmerjanje ukrepov trajnostne kmetijske pridelave.

KLJUČNE BESEDE

talni organski ogljik (TOC), ponori ogljika, RothC, obdelava tal, kmetijska zemljišča

ABSTRACT

Assessment of organic carbon sequestration in the soil of agricultural land in Slovenia

In the study we made an estimate of soil organic carbon (SOC) sequestration for agricultural soils of Slovenia for the period 2020–2040. We used the Rothamsted carbon model (RothC) used by FAO and adjusted it by using national data which are more accurate than data collected at the global level. The results are spatial raster layers of absolute average annual SOC sequestration rates, average relative SOC sequestration rates and 20-year uncertainty estimates (t SOC/ha per year) for four tillage scenarios: a) no changes in typical, prevailing practices and b) three levels of sustainable soil management scenarios. Estimates of SOC sequestration will enable the evaluation of SOC balance in agricultural land (resources/sinks) and a better targeting of sustainable agricultural measures.

KEY WORDS

soil organic carbon (SOC), carbon sinks, RothC, tillage, agricultural land

1 Uvod

Tla so pomemben ponor ogljika v kopenskih ekosistemih. Konvencionalno kmetijstvo je po drugi svetovni vojni intenziviralo pridelavo, da je ublažilo velika pomanjkanja hrane. Vendar so potrebe po hrani rastle in še rastejo zaradi povečevanja števila svetovnega prebivalstva pa tudi zaradi (potratnega) načina življenja (na primer količine zavržene hrane). Intenzivnost je v preteklosti temeljila na mineralnem gnojenju in intenzivni obdelavi tal, kar pa je med drugim osiromašilo tla, predvsem se je zmanjšala vsebnost organske snovi (TOS) in zalog organskega ogljika v tleh (TOC) (FAO 2017).

Namen uveljavljana trajnostne kmetijske pridelave je predvsem oskrbeti potrebe prebivalstva po hrani s čim manjšim vplivom na okolje in blaženje klimatskih sprememb. Pri tem je vezava (ponor) organskega ogljika (OC) v tla in povečanje TOC ključni ukrep, ki prispeva k zmanjševanju toplogrednega ogljikovega dioksida v ozračju.

Cilj študije je bil oceniti potencial slovenskih kmetijskih tal za vezavo TOC za obdobje 20 let (2020–2040) glede na različne scenarije:

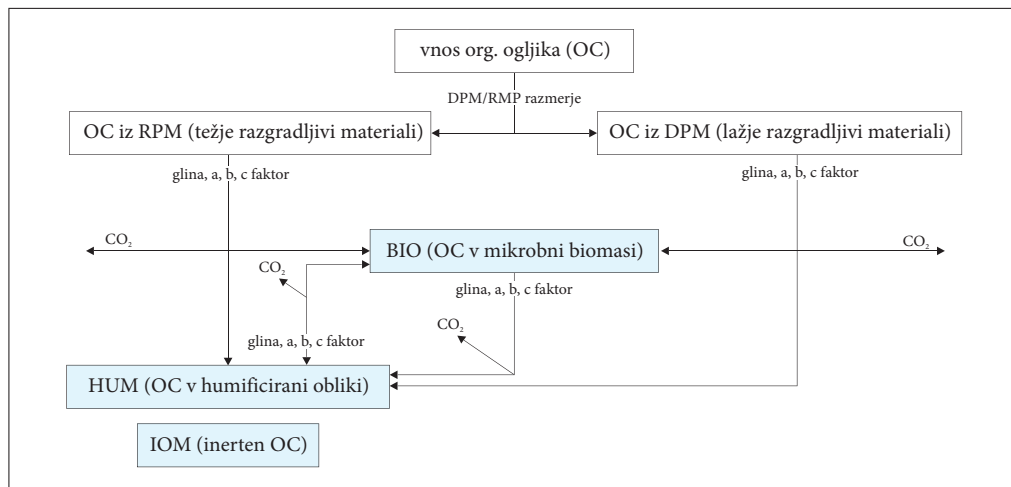
- BAU – scenarij, brez sprememb v kmetijskih praksah (angleško *business as usual*),
- SSM1 – scenarij trajnostnih kmetijskih praks s 5 % povečanjem vnosa OC na kmetijskih zemljiščih glede na BAU (prezimni posevki, zeleno gnojenje in podobno),
- SSM2 – scenarij trajnostnih kmetijskih praks z 10 % povečanjem vnosa OC na KZ glede na BAU,
- SSM3 – scenarij trajnostnih kmetijskih praks z 20 % povečanjem vnosa OC na kmetijskih zemljiščih glede na BAU.

Pomemben cilj študije je bil izdelati karto potenciala vezave TOC za Slovenijo na harmoniziran način in geoinformacijske sloje prispevati Organizaciji Združenih narodov za prehrano in kmetijstvo (FAO) in Globalnemu partnerstvu za tla (GSP), da jih vključijo v svetovno karto potenciala vezave TOC (*Global Soil Sequestration Potential (GSOCseq) Map*). Skladno s tem so marsikateri metodološki postopki, ločljivost (30 kotnih sekund) in koordinatni sistem (WGS 84) prilagojeni specifikacijam FAO in GSP (FAO 2020).

2 Model RothC

RothC (*Rothamsted carbon*) je model za oceno potenciala vezave oziroma skladiščenja TOC (Coleman in Jenkinson 1996) in eden najbolj uporabljenih v zadnjih 20-ih letih (Campbell in Paustian 2015; FAO 2019). FAO organizacija v okviru programa GSP je RothC prilagodila in ga predlagala kot metodo za izdelavo nacionalnih kart vezave TOC, ki jih bodo na FAO združili za oceno potenciala vezave TOC na svetovni ravni (FAO 2020). Poleg RothC obstaja še nekaj podobnih procesno orientiranih modelov napovedovanja zaloga OC v tleh; med drugim sorodni modeli YASSO (Liski s sodelavci 2005), ICBM (Andren in Kätterer 1997), C-TOOL (Taghizadeh-Toosi s sodelavci 2014) in CANDY (Franko s sodelavci 1997).

Model RothC preračuna OC, ki preide v tla v aktivno obliko OC, ter del OC, ki je inerten (IOM). Aktivni del vhodnega OC, ki prihaja v tla preko vnosa rastlinske biomase, se razdeli na OC iz razgradljive rastlinske biomase (angleško *decomposable plant material* – DPM) in na razgradnjo odpornejši OC iz rastlinske biomase (angleško *resistant plant material* – RPM). Razmerje je odvisno od vrste in seveda količine vhodnega rastlinskega materiala oziroma biomase. Večina kmetijskih rastlin ima razmerje 1,44 kar pomeni, da se v DPM pretvori 59 % rastlinskega materiala in 41 % v RPM (FAO 2020). Tako DPM kot RPM nadalje mineralizirata in tvorita ogljikov dioksid, mikrobnobio maso (angleško *microbial biomass* – BIO) in humificiran organski ogljik (angleško *humified organic matter carbon* – HUM). Delež DPM in RPM, ki mineralizira v ogljikov dioksid na eni strani ter v BIO in HUM, je v veliki meri odvisen od vsebnosti gline v tleh. Delež razgradnje na BIO in HUM v modelu je 46 % v BIO in 54 % v HUM. Na dinamiko nastanka HUM vpliva predvsem vsebnost gline, temperatura, vlažnost tal in pokrovnost tal. (Coleman in Jenkinson 1996; 2014; Fallon in Smith 2009).



Slika 1: Struktura modela RothC s ključnimi procesi pretvorbe in dejavniki, ki vplivajo na razgradnjo (a = temperaturni dejavnik, b = vlažnost tal, c = faktor pokrovnosti tal) (povzeto po Coleman in Jenkinson, 1996 in 2014 ter Falloon in Smith 2010).

3 Faze modeliranja in priprave podatkov

Za zagon modela RothC smo potrebovali ustrezno pripravljene prostorske podatke, ki smo jih pridobili iz različnih virov (preglednica 1). Celoten postopek smo poimenovali SloSOCseq in je vključeval pripravo podatkov, harmonizacijo podatkov, uporabo modela RothC, izdelavo prostorskih slojev in obdelavo rezultatov.

Izhodišča pri pripravi podatkov, ki smo jim sledili po specifikaciji FAO, so bile:

- globina modeliranja; 0–30 cm
- koordinatni sistem: WGS84, EPSG: 4326
- ločljivost prostorskih slojev: 30 kotnih sekund
- območje obdelave: kmetijska zemljišča Slovenije (iz baze Ministrstva za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano)

Model RothC poteka v treh fazah modeliranja (preglednica 1, slika 2). Vsaka faza zahteva specifične vhodne podatke:

- faza 1: *spin up* oziroma faza inicializacije
- faza 2: *warm up* oziroma faza ogrevanja
- faza 3: *forward* oziroma faza simulacije

Faza *spin up* simulira zgodovinski letni vnos OC v tla (t/ha) tako, da z njim doseže zalogo TOC v letu, za katerega imamo znan podatek TOC (časovna oznaka t_{-20}). V našem primeru smo imeli znan podatek zaloge TOC za leto 2000. Ta faza simulira letni vnos OC od leta 1500 do 2000.

Faza *warm up* uporablja podatke od leta 2000 (t_{-20}) do začetnega leta simulacije 2020 (t_0). Postopek kalibrira in prilagodi letni vnos OC v tla iz faze *spin up* na podlagi podatkov neto primarne produkcije (NPP) izdelane z modelom MIAMI (Lieth 1975), ki za vhodne podatke uporablja podatke letne količine padavin in povprečnih letnih temperatur.

Faza *forward* je faza napovedovanja zalog TOC za leto 2040 (t_{+20}). Absolutna vezava OC v tla (t/ha) je razlika med zalogami TOC leta 2040 in TOC leta 2000 glede na 4 scenarije. Iz nje preračunamo povprečno absolutno stopnjo vezave OC na letni ravni (t/ha leto). Relativna vezava OC v tla pa je razlika med napovedanimi zalogami TOC leta 2040 za 3 SSM scenarije v primerjavi z zalogami TOC leta 2040 po scenariju BAU.

Postopek SloSOCseq smo izdelali v programskih okoljih R in QGIS, kartografske izdelke in začetno pripravo podatkov pa s programskim paketom ESRI ArcInfo 10.0. Postopek je bil razdeljen v tri ključne faze (slika 3):

- I. priprava podatkov in harmonizacija (zbiranje podatkov, rasterizacija, prilagoditve ločljivosti, izdelava rastrskih zbirk) in določitev ciljnih točk za zagon modela RothC,
- II. modeliranje z modelom RothC (modeliranje vseh faz: *spin up*, *warm up* in *forward*),
- III. izdelava končnih produktov in kart (priprava končnih rastrskih slojev in kartografija).

Uporabili smo klimatske podatke povprečnih mesečnih temperatur (°C), mesečnih padavin (mm) in evapotranspiracije (mm) za obdobje 1981–2020. Podatke v rastrski obliki z ločljivostjo 1 km smo pridobili na Agenciji Republike Slovenije za okolje (Prostorski sloji klimatskih ... 2021). Sloje smo

Preglednica 1: Povzetek faz modeliranja in vhodnih podatkov za SloSOCseq.

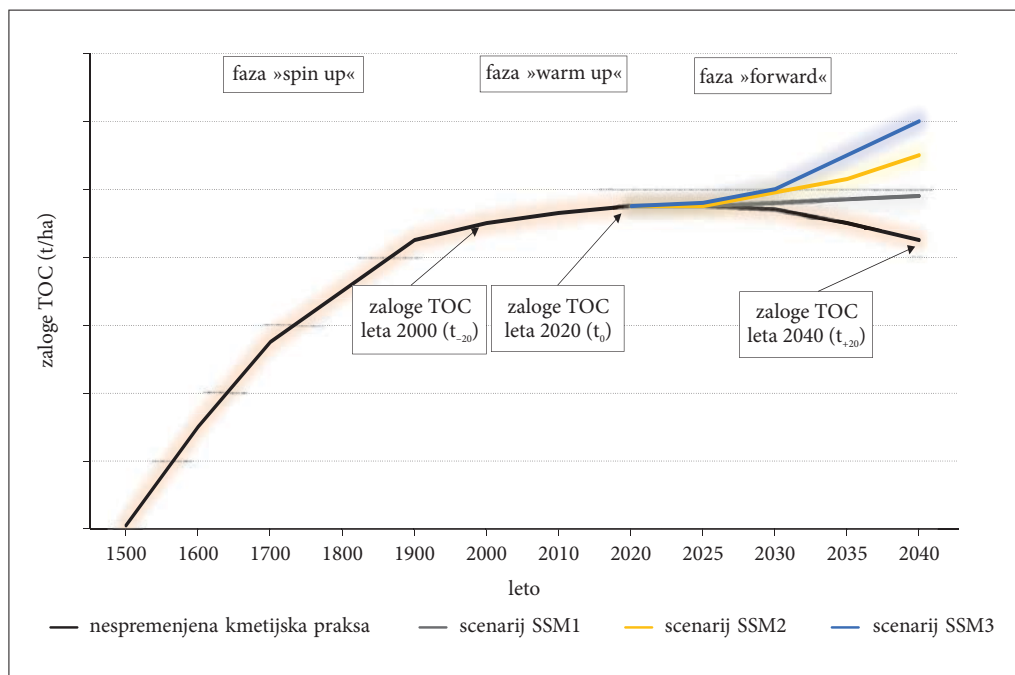
	faza 1 – <i>spin up</i>	faza 2 – <i>warm up</i>	faza 3 – <i>forward</i>
obdobje	500 let	20 let	20 let
klimatski podatki	mesečna povprečja 1981–2000 (padavine, temperature, evapotranspiracija)	mesečni podatki za obdobje 2001–2020 (padavine, povprečne temperature, evapotranspiracija)	mesečna povprečja 2001–2020 (padavine, temperature, evapotranspiracija)
pedološki podatki	delež gline 0–30 cm	delež gline 0–30 cm	delež gline 0–30 cm
začetne zaloge TOC	izračunane zaloge OC v IOM; ostali zalogovniki = 0	izračunane zaloge OC v IOM; ostali zalogovniki iz izračunov v fazi 1	izračunane zaloge OC v IOM; ostali zalogovniki iz izračunov v fazi 2
Vnosi ogljika (C)	1 t C ha ⁻¹	na podlagi NPP prilagojeni vnosi C za vsako leto	na podlagi NPP prilagojeni vnosi C za vsako leto, posebej za BAU; ocenjeni vnosi OC za % povečanja po SSM1, SSM2, SSM3 glede na scenarij BAU
pokrovnost	mesečna pokritost z vegetacijo iz NDVI 2001–2020	mesečna pokritost z vegetacijo iz NDVI 2001–2020	mesečna pokritost z vegetacijo iz NDVI 2001–2020
raba tal	reprezentativni sloj rabe tal za obdobje 1980–2000 (2002)*	reprezentativni sloji rabe tal za vsako leto 2001–2020	reprezentativni sloj rabe tal za leto 2020 (2021)*
scenariji modeliranja	BAU	BAU	BAU, SSM1, SSM2, SSM3
pričakovani rezultati	skupne zaloge TOC in zaloge TOC po zalogovnikih za leto t_{-20} (2000)	skupne zaloge TOC in zaloge TOC po zalogovnikih za leto t_0 (2020)	skupne zaloge TOC in zaloge TOC po zalogovnikih za leto t_{+20} (2040); absolutne in relativne vezave TOC za scenarije SSM1, SSM2 in SSM3; absolutne in relativne stopnje vezave TOC za scenarije SSM1, SSM2, SSM3.

* Po besedah MKGP sloj rabe zemljišč za tekoče leto, prikazuje dejansko stanje za preteklo leto. Za leto 2001 podatka ni bilo na voljo, zato je bilo uporabljen podatek leta 2002.

pretvorili v koordinatni sistem WGS84 (EPSG: 4326), pri pretvorbi pa vrednosti preračunali po bilinearni metodi.

Delež gline smo ocenili iz podatkov pedoloških profilov obdobja 1960–1999 (Podatki pedološke karte ... 2007), jih preračunali na globino 0–30 cm ter jih z uporabo obteženega povprečja glede na zastopanost talnih tipov preračunali na talne kartografske enote (TKE) Pedološke karte 1:25.000 (PK25). Vse TKE, kjer podatka o glini nismo imeli zaradi neujemajoče povezave preko talne sistemske enote (TSE), smo izločili iz obdelave. Območjem organskih tal oziroma histosolov iz PK25 smo pripisali povprečno vsebnost gline 45 % ugotovljeno iz 11 lokacij vzorčenih na območju histosolov med leti 2016 in 2021. Pri rasterizaciji smo uporabili bilinearno metodo.

Sloj TOC smo izdelali iz podatkov zbirke 1681 talnih profilov PK25 izkopanih med leti 1960 in 1999. Iz slednjega sledi temeljna predpostavka, da karta TOC za Slovenijo predstavlja stanje zalog v tleh leta 2000. Vsebnosti talne organske snovi (TOS; %), volumske gostote (g/cm^3) in volumskega deleža skeleta (%) v tleh smo preračunali na globino 0–30 cm in izračunali zaloge TOC (t/ha). Izločili smo vse profile, kjer je bila izračunana vrednost nerealna ($> 180 \text{ tOC}/\text{ha}$) in na ta način vključili 1267 talnih profilov. Količine zalog TOC smo razširili na prostor z metodo prostorskega ujemanja profilov in predhodno ustvarjenih območij, ki so bila kombinacija vrste rabe zemljišč iz leta 2017 in pedosekvenc (Stritar 1991). Nato smo iz prostorsko ujemajočih talnih profilov za vsako območje izračunali povprečno zalogo TOC v tleh. Od skupno 89 območij, smo zaloge TOC iz profilov lahko pripisali 51 območjem, kar znaša 1.904.386 ha oziroma 94 % površja Slovenije. Za 6 % oziroma 122.929 ha pa ujemajočih profilov nismo imeli in so prejeli vrednost *nodata*. Pri avtomatskem procesu je prišlo do nelogičnosti, saj so bile talnim kartografskim enotam, ki obsegajo pozidana območja, vodne površine in gramoznice, pripisane vrednosti TOC, čeprav dejansko tal tam ni oziroma so le plitva tla in so zaloge TOC minimalne. Zato smo iz pedološke karte izbrali TKE s prevladujočimi talnimi tipi (TSE); urbana območja (991), vodna površina (992), kamnolom (993), gramoznica (994), deponija (995), nerodovitno (996)

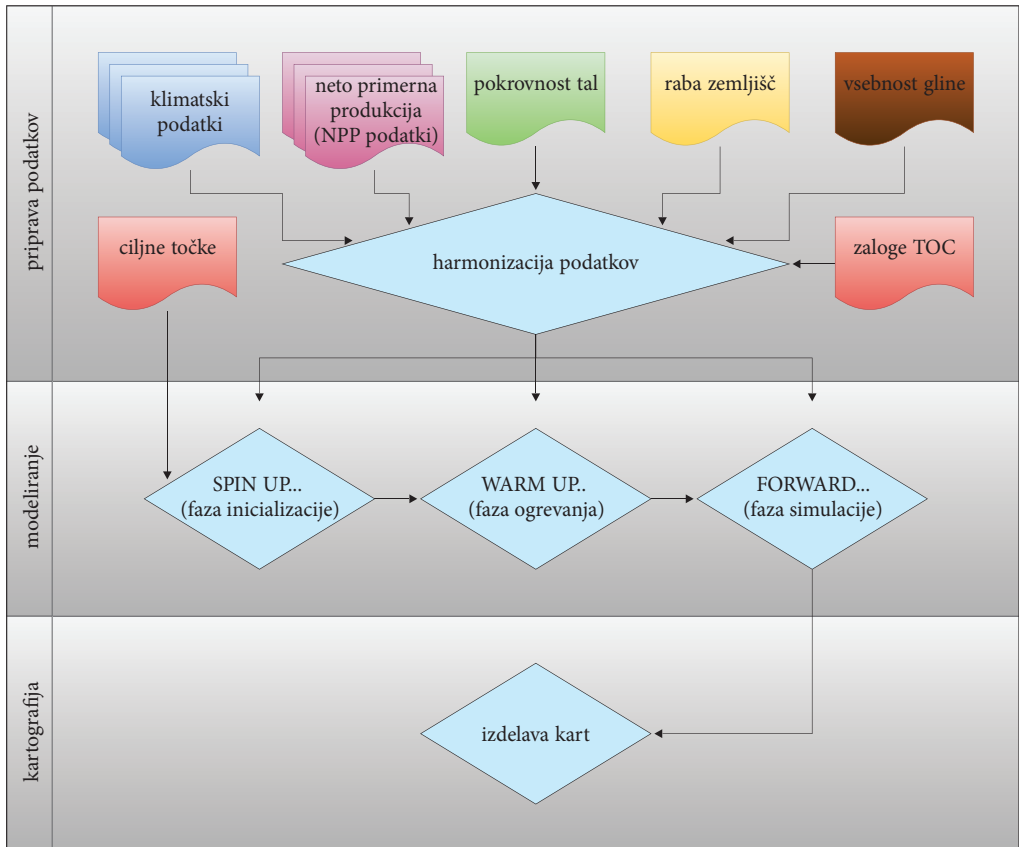


Slika 2: Faze modeliranja zalog TOC v modelu RothC.

ter z njimi izločili območja iz rastrskega sloja zalog OC v tleh. Dodatno smo vsem nerazvitim tлом iz pedološke karte, TSE 1 (litosol, karbonaten na apnencu in dolomitu) in TSE 3 (litosol, karbonaten na pobočnem grušču), pripisali vrednost 0 tOC/ha. Na območju organskih tal oziroma histosolov (šotnih tal in oglejenih šotnih tal) smo privzeli povprečno vrednost 200 tOC/ha izračunanega iz 11 lokacij vzorčenj opravljenih v obdobju 2016–2021.

Mesečno pokritost tal z vegetacijsko odejo, ki jo potrebujemo za oceno dekompozicijskega faktorja, smo pridobili iz indeksa NDVI izračunanega iz satelitskih posnetkov MODIS (Satelitski posnetki ... 2021). Uporabili smo vse produkte časovne vrste posnetkov med leti 2001 in 2020 v ločljivosti 1 km s približno časovno frekvenco posnetka na 16 dni. Rastrske celice z vrednostmi NDVI, ki so bile višje od izbranega praga (NDVI > 0,6), nakazujejo aktivno rast vegetacije (FAO 2020). Rezultat je 12 rastrskih slojev povprečne mesečne verjetnosti pokritosti z vegetacijo za obdobje 2001–2020 v ločljivosti 1 km.

Za **rabo zemljišč** smo uporabili podatke rabe zemljišč Ministrstva za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano (Podatki dejanske rabe zemljišč ... 2021) veljavne za obdobje 2000–2020. Sloje smo rasterizirali na ločljivost 1 km, za pripis vrednosti v celico smo uporabili metodo največje površine, sloj pa pretvorili v koordinatni sistem WGS84. Opravili smo prevedbo razredov rabe iz šifer Ministrstva za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano v 11 razredov rabe zemljišč po FAO (FAO *Global Land Cover*).



Slika 3: Shematski prikaz podatkovnega modela SloSOCseq za izdelavo ocene vezave OC v tla za obdobje 2020–2040.

4 Rastrske zbirke in izbira ciljnih točk

Sledila je faza harmonizacije podatkov s tremi osnovnimi nameni: a) prilagoditev izhodiščnih meja vhodnih rastrskih slojev z izhodišči matičnega rastra (angleško *master layer*), v našem primeru slojem zalog TOC, b) uskladitev ločljivosti z matičnim rastrom, c) obrez meja rastrskih slojev z mejo Slovenije.

V koraku harmonizacije smo pripisali tudi razmerja DPM/RPM posameznim rabam zemljišč. DPM/RPM opredeljuje razmerje med lažje in težje razgradljivim rastlinskim materialom.

V okolju R smo izdelali zbirke harmoniziranih rastrskih slojev ločeno za vsako fazo modela.

Rastrska zbirka harmonizacije za fazo *spin up* vključuje:

- harmoniziran sloj zaloge TOC,
- harmoniziran sloj vsebnosti gline,
- harmonizirano zbirko mesečnih povprečnih temperatur 1981–2000,
- harmonizirano zbirko mesečnih povprečnih količin padavin 1981–2000,
- harmonizirano zbirko mesečnih povprečnih evapotranspiracij 1981–2000,
- razmerja DPM/RPM po rabah zemljišč za leto 2000,
- harmoniziran sloj rabe zemljišč po FAO za leto 2000,
- harmonizirano zbirko verjetnosti pokritosti tal z vegetacijo.

Drugi rezultat harmonizacije je rastrska zbirka faze *warm up* in vključuje:

- rastrski sloj zalog TOC,
- harmoniziran rastrski sloj vsebnosti gline,
- rastrsko zbirko verjetnosti pokritosti z vegetacijo,
- harmonizirane rastrske sloje rabe zemljišč po kategorijah FAO za obdobje 2001–2020,
- faktorje razmerij DPM/RPM za obdobje 2001–2020.

Tretji rezultat harmonizacije je rastrska zbirka faze *forward* in vključuje:

- rastrski sloj zalog TOC,
- harmoniziran rastrski sloj vsebnosti gline v tleh,
- harmonizirano rastrsko zbirko mesečnih povprečnih temperatur 2001–2020,
- harmonizirano rastrsko zbirko mesečnih povprečnih količin padavin 2001–2020,
- harmonizirano rastrsko zbirko mesečnih povprečnih evapotranspiracij 2001–2020,
- faktorje razmerij DPM/RPM za leto 2020,

Preglednica 2: Razmerja DPM/RPM pripisana rabam zemljišč po FAO v modelu SloSOCseq.

šifra	raba	pripisano razmerje DPM/RPM
01	pozidane površine	/
02	obdelovalna zemljišča	1,44
03	travinje	0,67
04	drevesa/gozd	0,25
05	grmičevje	0,67
06	vegetacija mokrišč	0,67
07	mangrove	/
08	razpršena vegetacija	0,67
09	gola tla	/
10	sneg in ledeniki	/
11	voda	/
12	trajni nasadi	1,44
13	riževa polja	1,44

- harmoniziran rastrski sloj rabe zemljišč po FAO kategorijah za leto 2020 ,
- harmonizirano rastrsko zbirko verjetnosti pokritosti z vegetacijo.

Za določitev ciljnih točk smo izbrali območja kmetijskih zemljišč Slovenije ter jih v fazi priprave podatkov pretvorili v vektor oziroma atributno tabelo. Modeliranje RothC (II. faza) namreč poteka na tabelarni ravni. V zadnji fazi (III. faza) smo rezultate v vektorski obliki rasterizirali, da smo na ta način izdelali prostorske sloje.

5 Rezultati in razprava

Rezultat SloSOCseq postopka je ocena zalog TOC v globini 0–30 cm za leto 2040 glede na 4 scenarije (BAU, SSM1, SSM2, SSM3) in povprečna letna vezava OC za vsakega od njih za obdobje 20 let (2020–2040) na območju kmetijskih zemljišč Slovenije.

Sloji obsegajo 289.152 ha oziroma 43,1 % kmetijskih zemljiščih, čeprav naj bi model vključeval vsa kmetijska zemljišča, ki jih je v Sloveniji 670.934 ha (Podatki dejanske rabe zemljišč ... 2021). Do popačenja površin pride zaradi uporabe rastrskih slojev v resoluciji 30 kotnih sekund oziroma 0,00833 stopinj (specifikacija FAO), ki je za izražanje površin manj primerna. Zlasti ob dejstvu, da ima Slovenija zelo pestro prostorsko spremenljivost rabe tal.

V primeru nespremenjenih kmetijskih praks (scenarij BAU) do leta 2040 pričakujemo zmanjšanje zalog TOC na kmetijskih zemljiščih in sicer v povprečju vsako leto za 0,08 tOC/ha. To pomeni, da se naj bi se v obdobju 2020 do 2040 na kmetijskih zemljiščih zaloga TOC do globine 30 cm vsako leto zmanjšala za 23,8 kt.

Po scenariju BAU skoraj 75 % površin zajetih v model izkazuje negativen trend in izgube zalog TOC. Razlike seveda obstajajo predvsem med različnimi vrstami kmetijskih zemljiščih a pričakujemo, da se bodo zaloge TOC zmanjšale na vseh rabah.

Po scenariju SSM1 (povečanje vnosa C za 5 %) pričakujemo pozitivne trende in povečevanje zalog TOC ter prehod nekaterih zemljišč iz območij izpustov v območja ponorov. Skupna povprečna letna absolutna vezava OC naj bi bila sicer še vedno negativna, vendar višja kot pri scenariju BAU in sicer $-0,003$ tOC/ha na leto, kar pomeni skupno izgubo 1 ktOC/leto. V primerjavi s scenarijem BAU (relativno) pričakujemo po scenariju SSM1 letno v povprečju 0,08 tOC/ha višjo vezavo v tla kot po scenariju BAU oziroma skupno 22,8 ktOC več kot po scenariju BAU. Po scenariju SSM1 naj bi približno polovica kmetijskih zemljišč obravnavanih v postopku SloSOCseq beležila povečevanje zalog TOC. Po scenariju SSM1 pričakujemo, da bodo imela obdelovalna zemljišča že pozitivno povprečje (0,012 tOC/ha na leto) kar pomeni večanje zalog TOC glede na leto 2020 za 1,5 ktOC/leto.

Po scenariju SSM2 (povečanje vnosa C za 10 %) naj bi bila tudi skupna povprečna letna absolutna vezava OC že pozitivna in sicer 0,08 tOC/ha na leto, kar pomeni skupno povečanje zalog TOC v primerjavi z letom 2020 za 21,8 ktOC/leto. Po scenariju SSM2 naj bi se v tla vezalo 0,16 tOC/ha na leto oziroma 45,6 ktOC več kot bi se ga po scenariju BAU. Po scenariju SSM2 bo povprečna vezava OC na vseh vrstah kmetijskih zemljišč razen zaraščajočih površinah že pozitivna.

Po scenariju SSM3 (povečanje vnosa C v tla za 20 %) pričakujemo, da bo povprečna absolutna vezava OC glede na stanje zalog TOC leta 2020 na letni ravni 0,23 tOC/ha na leto, kar skupno pomeni vezavo 67,3 ktOC/leto. Relativno naj bi se po scenariju SSM3 v tla vezalo 0,32 tOC/ha na leto več kot po scenariju BAU, kar pomeni skupno 91,1 ktOC/leto. Po scenariju SSM3 pričakujemo, da bo povprečna absolutna vezava OC v tla na vseh rabah kmetijskih zemljišč pozitivna.

FAO je v letu 2022 izdala poročilo z rezultati potenciala za vezavo OC iz 50 nacionalnih poročanj ter obdelala rezultate na različnih prostorskih nivojih. Za zmerno toplo vlažno podnebje po IPCC klasifikaciji, kamor lahko uvrstimo večino območja Slovenije, je povprečna relativna stopnja vezave OC (angleško *relative sequestration rate* – RSR) po scenariju SSM3 za 0,09 tOC/ha nižja (0,23 tOC/ha na leto), kot kaže model SloSOCseq za Slovenijo, in sicer 0,32 tOC/ha na leto (FAO 2022). Primerjava RSR za scenarij SSM3 iz vseh 50-ih vključenih držav z rezultati modela SloSOCseq po rabah zemljišč kaže,

da na vseh rabah zemljišč model SloSOCseq podaja višje povprečne stopnje vezave OC in sicer na obdelovalnih površinah 0,25 tOC/ha (svetovno povprečje RSR po FAO je 0,18 tOC/ha), na travinju 0,37 tOC/ha (svetovno povprečje RSR po FAO je 0,19 tOC/ha) in na grmovnih in zaraščajočih površinah 0,35 tOC/ha (svetovno povprečje RSR po FAO je 0,16 tOC/ha). Nižjo letno stopnjo RSR imajo po modelu SloSOCseq le trajni nasadi in sicer 0,25 tOC/ha (svetovno povprečje RSR po FAO je 0,3 tOC/ha) (FAO 2022).

Po scenariju BAU pričakujemo zmanjševanje zalog TOC na večini kmetijskih zemljišč. Med najbolj vidnimi lahko izpostavimo kmetijska zemljišča celotne Ljubljanske kotline z Ljubljanskim barjem, podolja dinarskega krasa in kraških polj (z izjemo Bele Krajine), Vipavska dolina, KZ širšega Posočja in Zahodnega predalpskega hribovja. Nekoliko manjše izgube TOC lahko pričakujemo na območju doline Mure, doline reke Ščavnice in Pesnice, vzhodni del doline reke Drave, vzhodni del Posavskega hribovja (med Sevnico, Laškim in Šentjurjem), zahodni del Celjske kotline na območju Savinjske doline (Braslovško polje) (slika 4).

6 Sklep

Rezultati modeliranja kažejo, da lahko do leta 2040 pričakujemo postopno letno zmanjševanje zalog TOC v globini 0–30 cm, kar posledično pomeni povečanje izpustov ogljikovega dioksida ter slabšo kakovost kmetijskih tal. Kljub temu, da imamo v Sloveniji v povprečju tla z dokaj visoko vsebnostjo organske snovi, pa zmanjševanje vsebnosti talne organske snovi zmanjšuje kmetijsko in okoljsko kakovost tal.

Po scenariju BAU lahko pričakujemo povprečno stopnjo zmanjševanja $-0,08$ tOC/ha letno. Z razširitvijo rabe trajnostnih kmetijskih praks lahko pričakujemo tudi pozitivne učinke na tla in podnebje ter povečevanje zalog C v tleh. Vendar po scenariju SSM1 pričakujemo v povprečju sicer še vedno negativen trend ($-0,003$ tOC/ha na leto), a na obdelovalnih zemljiščih naj bi se organski C že povečeval z letno stopnjo $0,01$ tOC/ha na leto. Večji kvalitativni preskok bi dosegli s scenarijem SSM2, kjer bi bila tudi skupna povprečna vezava OC v tla že pozitivna ($0,08$ tOC/ha leto). Po scenariju SSM2 bi v povprečju vse vrste rabe, razen zaraščajočih površin, predstavljale ponor ogljika. Po scenariju SSM3 bi bila povprečna letna vezava $0,23$ tOC/ha na leto in vse vrste zemljišč bi predstavljale območja povečevanja zalog TOC.

Rezultati modeliranja potencialov vezave ogljika v kmetijska tla so nazorni in koristni. Jasni so v tem, da ni možno govoriti o trajnostnem kmetijstvu, v kolikor ustrezno ne naslovimo in prilagodimo kmetijske pridelave na način, ki bo povečal vsebnost talne organske snovi (SSM3). Ta povečanja bodo (pričakovano) okrepila pridelavo v smislu kakovosti in stabilnosti. Modeliranje v prostoru je koristno, saj rezultati nakazujejo, kje in deloma v kakšni meri je treba pospeševati agrotehnične ukrepe, ki povečujejo vezavo ogljika v tla.

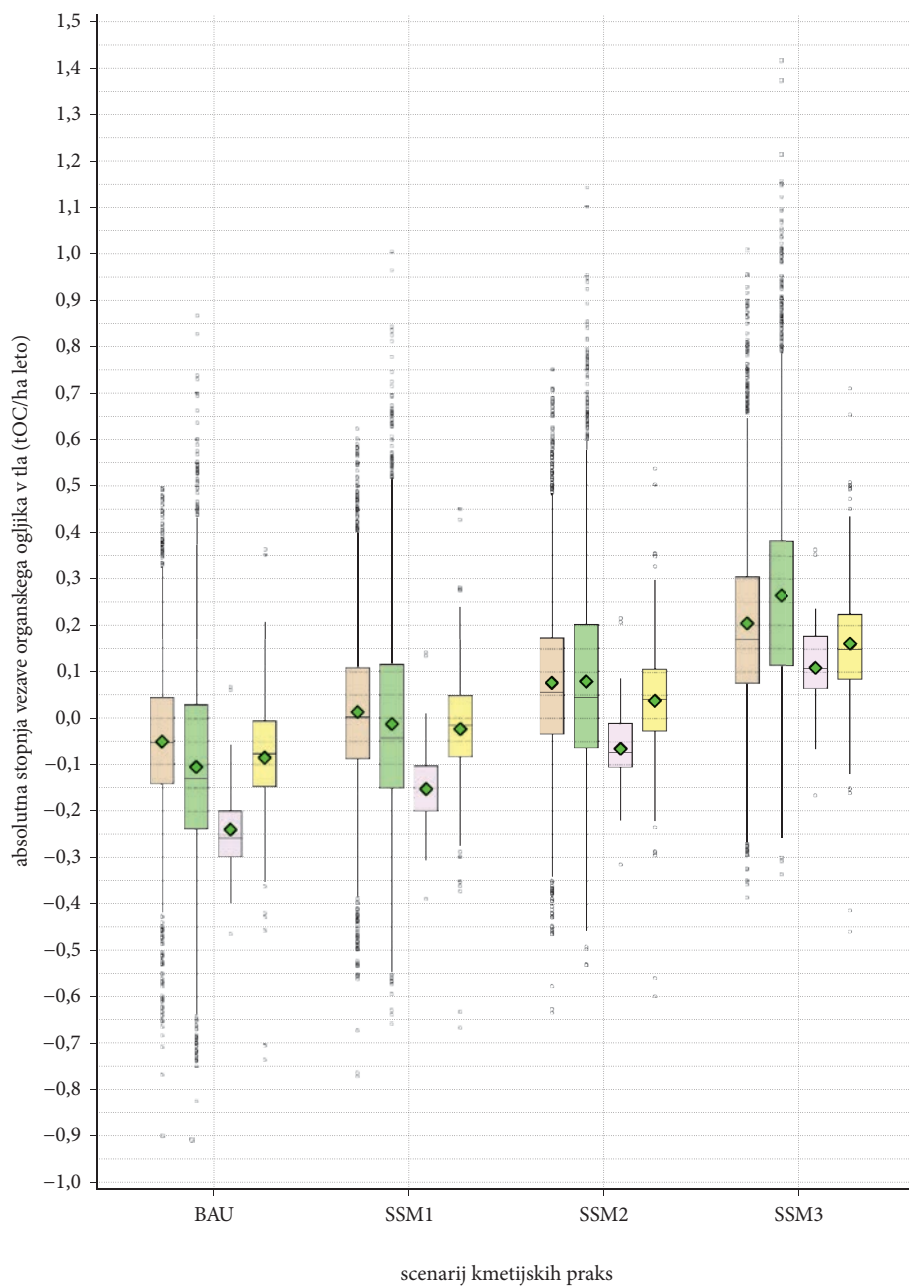
Kljub zadovoljivim in logičnim rezultatom modeliranja v resoluciji 30 kotnih sekund, kar je bilo navdilo FAO, nas v prihodnje zanimajo rezultati TOC s Sloveniji prilagojenimi specifičnih parametri (na primer drugačna razmerja DPM/RPM) in uporabo boljše prostorske ločljivosti vhodnih podatkov; na primer 12,5 m. Model SloSOCseq želimo v prihodnosti nadalje razvijati in vključiti gozdna zemljišča, za izdelavo karte zalog TOC pa uporabiti novejša vzorčenja zalog TOC ter modeliranje ponoviti v boljši prostorski ločljivosti.

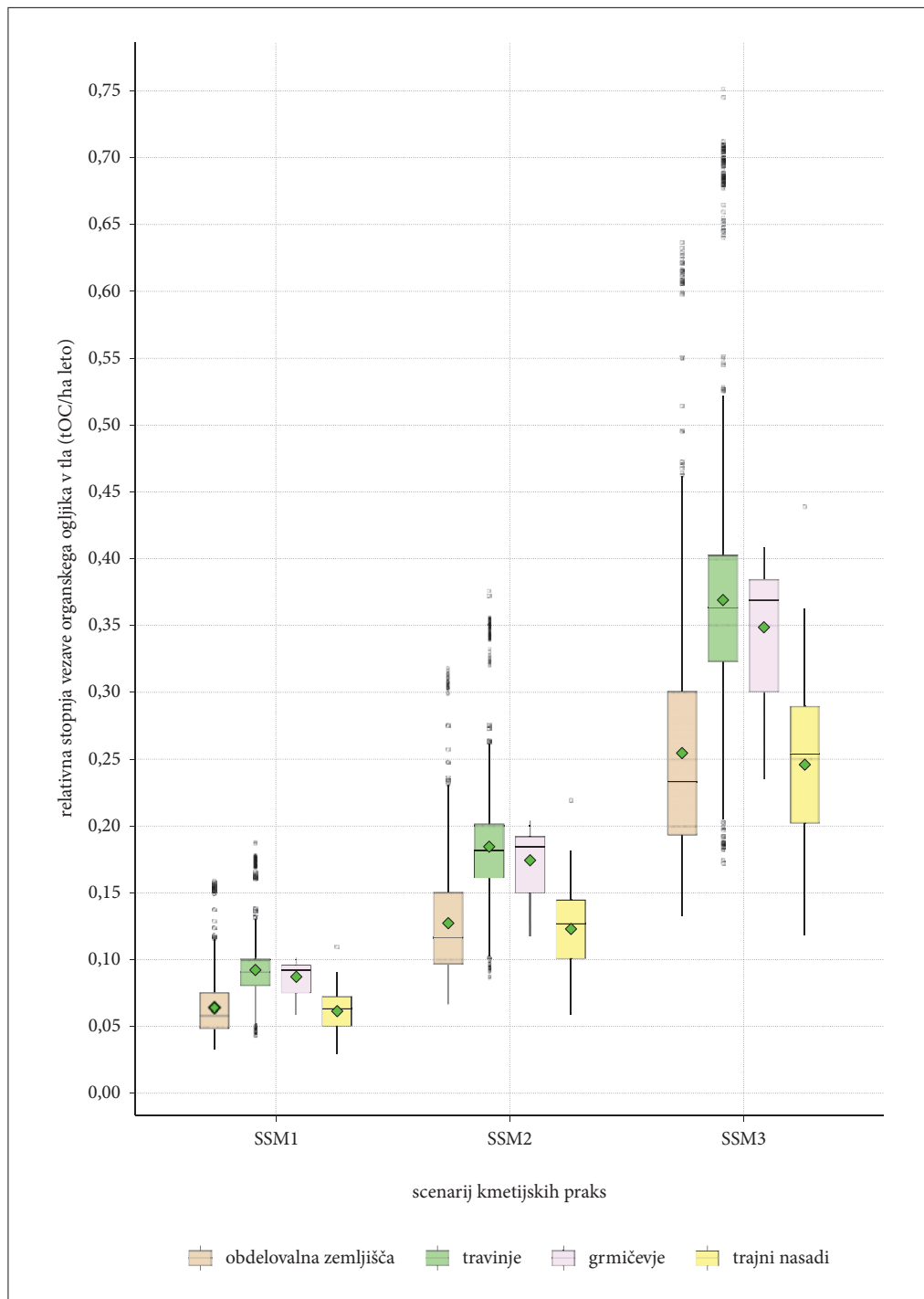
Slika 4: Povprečna absolutna letna vezava OC v tla (tOC/ha na leto) po obravnavanih rabah zemljišč v obdobju 2020–2040 (zeleni simbol na grafu kvartilov označuje povprečje). ► (str. 80)

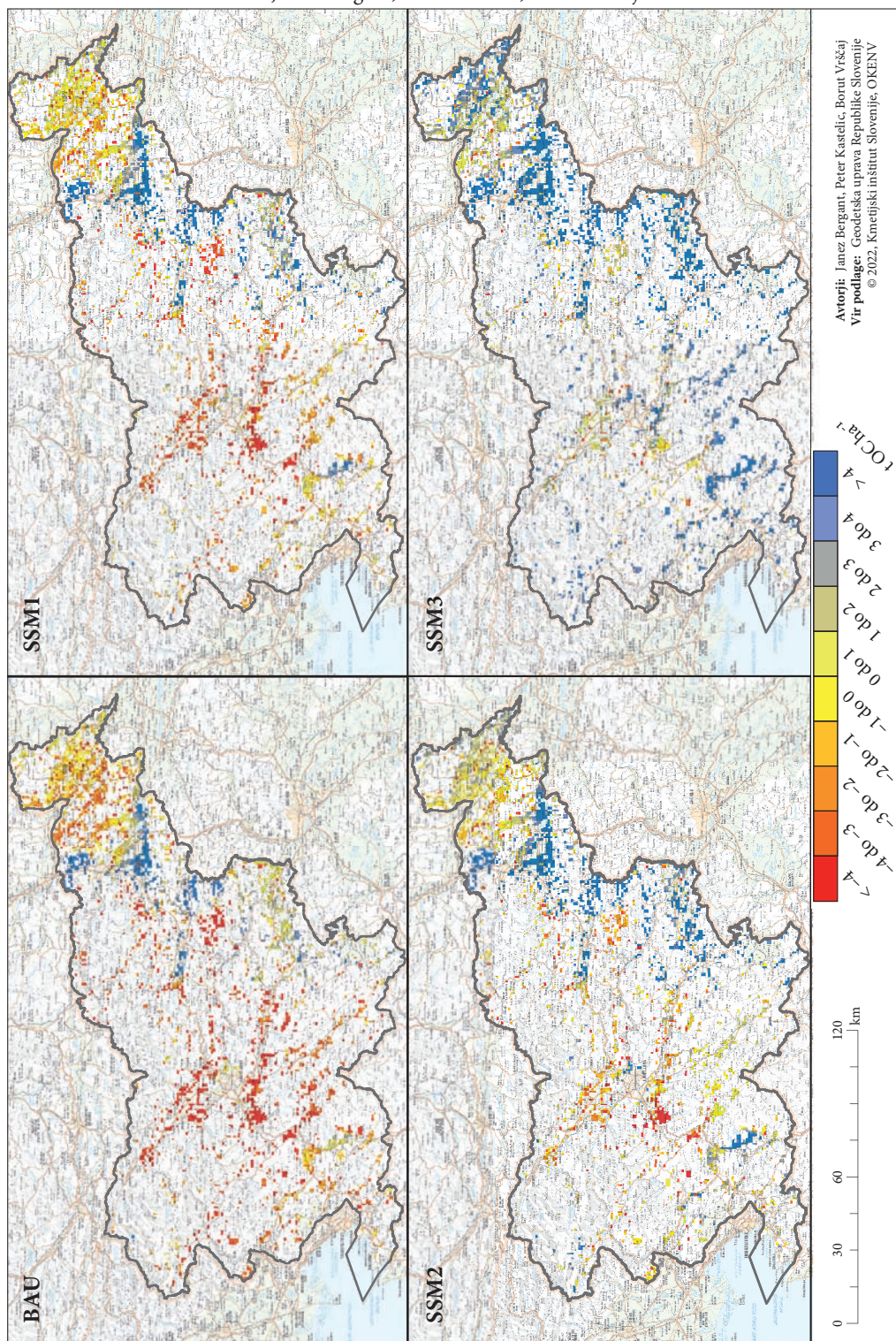
Slika 5: Povprečna relativna letna vezava OC v tla (tOC/ha na leto) po obravnavanih rabah zemljišč (zeleni simbol na grafu kvartilov označuje povprečje). ► (str. 81)

Slika 6: Karta absolutnih razlik zalog OC v tleh (tOC/ha) na kmetijskih zemljiščih med leti 2020 in 2040 po štirih scenarijih. ► (str. 82)

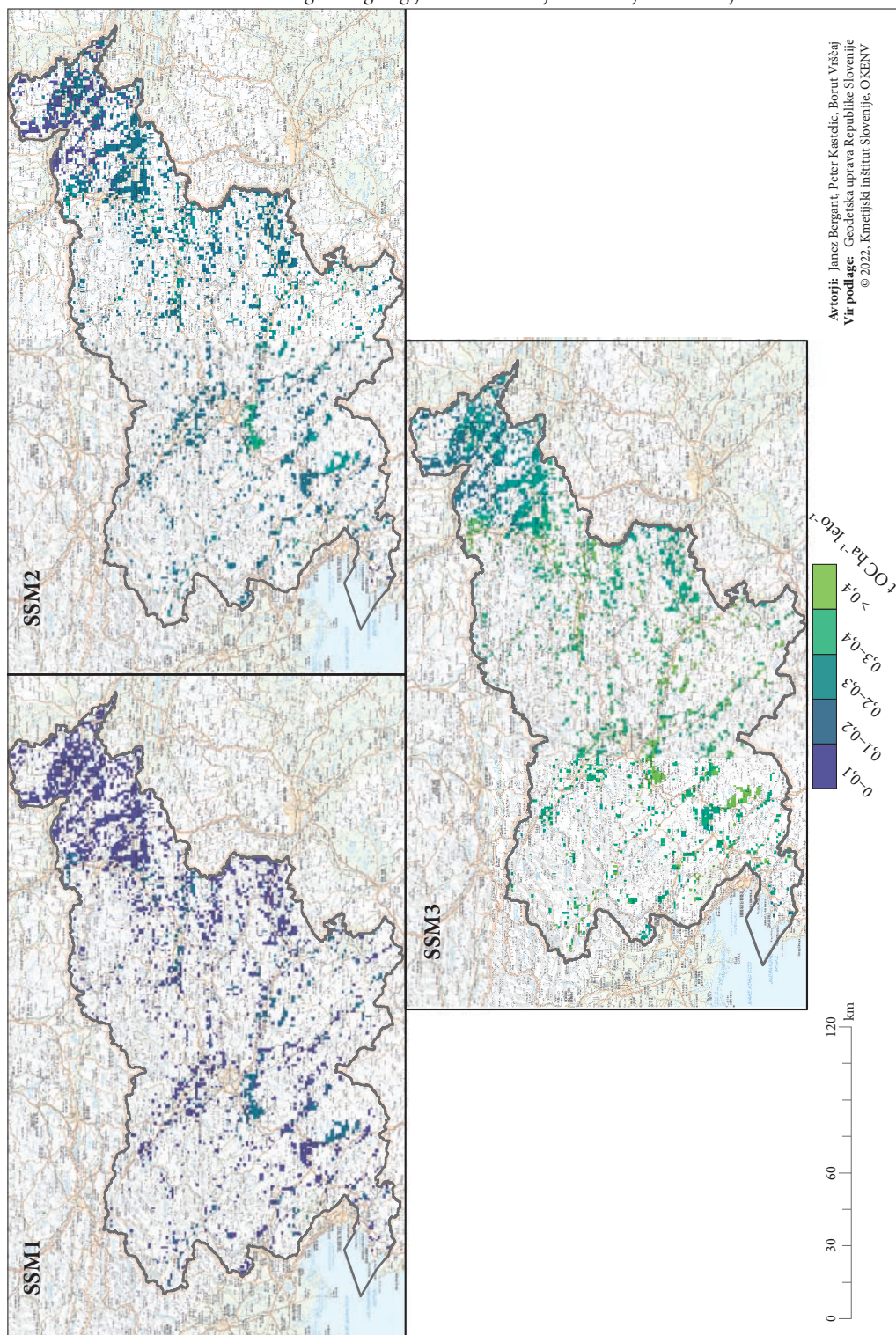
Slika 7: Karta relativne letne vezave OC v tla (tOC/ha na leto) na kmetijskih zemljiščih med leti 2020 in 2040 po štirih scenarijih. ► (str. 83)







Ocena vezave organskega ogljika v tla kmetijskih zemljišč Slovenije



7 Viri in literatura

- Andrén, O., Kätterer, T. 1997: ICBM: the introductory carbon balance model for exploration of soil carbon balances. *Ecological Applications* 7. DOI: [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(1997\)007\[1226:ITICBM\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(1997)007[1226:ITICBM]2.0.CO;2)
- Campbell, E. E., Paustian, K. 2015: Current developments in soil organic matter modeling and the expansion of model applications: A review. *Environmental Research Letters* 10-12. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/123004>
- Coleman, K., Jenkinson, D. S. 1996: RothC-26.3 - A Model for the turnover of carbon in soil. IACR – Rothamsted, Harpenden, Herts. AL5 2JQ. U.K.
- Coleman, K., Jenkinson, D. S. 2014: RothC - A Model for the turnover of carbon in soil. Model description and user guide (Windows version), updated June 2014.
- Falloon, P., Smith, P. 2010: Modelling soil carbon dynamics. *Soil Carbon Dynamics*. Cambridge. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511711794.013>
- FAO, 2017. Soil organic carbon: the hidden potential. Rim.
- FAO, 2019: Measuring and modelling soil carbon stocks and stock changes in livestock production systems – Guidelines for assessment. Rim.
- FAO, 2020: Technical specifications and country guidelines for Global Soil Organic Carbon Sequestration Potential Map (GSOCseq). Rim.
- FAO, 2022: Global Soil Organic Carbon Sequestration Potential Map – GSOCseq v.1.1 - Technical report. Rim. DOI: <https://doi.org/10.4060/cb9002en>
- Franko, U., Crocker, G. J., Grace, P. R., Klir, J., Körschens, M., Poulton, P. R., Richter, D. D. 1997: Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using the CANDY model. *Geoderma* 81. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(97\)00084-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00084-0)
- Lieth, H., 1975. Modeling the primary productivity of the world. *Primary Productivity of the Biosphere, Ecological Studies* 14. Berlin, Heidelberg. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-80913-2_12
- Liski, J., Palosuo, T., Peltoniemi, M., Sievänen, R. 2005: Carbon and decomposition model Yasso for forest soils. *Ecological Modelling* 189, 1-2. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.005>
- Podatki pedološke karte 1:25.000 in pedoloških profilov. Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano. Ljubljana, 2007.
- Podatki dejanske rabe zemljišč 2002–2021. Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano. Ljubljana, 2021.
- Prostorski sloji klimatskih podatkov 1981–2020. Agencija Republike Slovenije za okolje. Ljubljana, 2021.
- Satelitski posnetki MODIS MOD13A2.006 Terra Vegetation Indices. NASA, 2021.
- Stritar, A. 1991: Pedologija: kompendij. Ljubljana.
- Taghizadeh-Toosi, A., Christensen, B. T., Hutchings, N. J., Vejlin, J., Kätterer, T., Glendining, M., Olesen, J. E. 2014: C-TOOL: A simple model for simulating whole-pro-*le* carbon storage in temperate agricultural soils. *Ecological Modelling* 292. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.08.016>