

INDEKS VLAŽNOSTI TAL POMURJA: PRIMER UPORABE PODATKOV SATELITA LANDSAT 8

Danijel Davidovič

Asist., mag. geog. in mag. fil.
Mednarodni center za ekoremediacije
Filozofska fakulteta
Koroška cesta 160, SI - 2000 Maribor, Slovenija
e-mail: danijel.davidovic@um.si

Danijel Ivajnsič

Doc. dr., prof. biol. in geog.
Oddelek za geografijo
Filozofska fakulteta
Oddelek za biologijo
Fakulteta za naravoslovje in matematiko
Koroška cesta 160, SI - 2000 Maribor, Slovenija
e-mail: dani.ivajnsic@um.si

UDK: 631.432: 528.88

COBISS: 1.01

Izveček

Indeks vlažnosti tal Pomurja: primer uporabe podatkov satelita Landsat 8

V prispevku obravnavamo uporabo metode računanja vlažnosti tal s satelitskimi podobami na primeru Pomurja. Predstavljen indeks vlažnosti tal je derivat temperature površja in vegetacijskega indeksa NDVI, pri tem so uporabljeni spektralni pasovi, zaznani z optičnim in termičnim senzorjem satelita Landsat 8. Dobljene vrednosti indeksa vlažnosti tal zavzemajo vrednosti med 0 (nizka vlažnost tal) in 1 (visoka vlažnost tal). V nadaljevanju preverjamo razlike v vlažnosti tal gleda na intenzivno ali bolj ekstenzivno kmetijsko rabo. Izračunane ocene vlažnosti tal v Pomurju se gibljejo med 0,06–0,99, pri tem se pojavljajo statistično signifikantne razlike med višjimi vrednostmi v gozdovih ter nižjimi vrednostmi na njivah in drugih izbranih zemljiških kategorijah. Tovrstni pristop k oceni vlažnosti tal je uporaben za monitoring in načrtovanje kmetijskih in okoljevarstvenih dejavnosti na regionalni ravni hkrati pa omogoča prognozo vpliva podnebnih sprememb na vlažnostne razmere v danem prostoru.

Ključne besede

daljinsko zaznavanje, geografski informacijski sistemi, indeks vlažnosti tal, Landsat, normiran diferencialni vegetacijski indeks, temperatura površja

Abstract

Soil moisture index in Pomurje: an example of Landsat 8 satellite data use

This research demonstrates the methodological implementation of satellite imagery for evaluation of soil moisture in the case of Pomurje (Slovenia). The presented soil moisture index is a derivative of surface temperature and NDVI vegetation index, using spectral bands detected by optical and thermal sensor of the Landsat 8 satellite. The obtained values of the soil moisture index vary between 0 (low soil moisture) and 1 (high soil moisture). Furthermore, we observe the differences in soil moisture with regard to intensive or extensive agricultural land use. The calculated estimates of soil moisture in Pomurje reached values between 0.06–0.99, with statistically significant differences between higher values in forests and lower values in fields and other selected landuse categories. This approach to soil moisture assessment is useful for monitoring and planning agricultural and environmental activities at the landscape level and for evaluating the climate change impact on the humidity conditions in a given area.

Danijel Davidović, Danijel Ivajnsič: Indeks vlažnosti tal Pomurja: primer uporabe podatkov ...

Key words

Geographic information system, Landsat, land surface temperature, normalized difference vegetation index, remote sensing, soil moisture index

Uredništvo je članek prejelo 2.9.2020

1. Uvod

Vlažnost tal pomeni količino vode v tleh in predstavlja enega najpomembnejših členov energijskih in snovnih tokov ekosistemov. Hkrati je eden najpomembnejših dejavnikov rasti kulturnih rastlin in prehranske varnosti. Voda v tleh se pojavlja v obliki ledu, vodne pare in tekočine, slednja je lahko gravitacijska, ki se zaradi težnosti premika proti nižjim območjem; kapilarna, ki se zaradi površinske napetosti premika v vse smeri proti manj vlažnim območjem; higroskopska, ki je zaradi adsorpcije vezana na talne delce; kemična, ki je s kemičnimi vezmi vezana v molekulah; filmska, ki obdaja talne delce; in podtalnica, ki zapolnjuje vse pore nad neprepustno kamnino (Kovačič 1966). Voda v tleh zvezno prehaja med posameznimi oblikami, za kmetijstvo pa je najpomembnejša kapilarna v območju rasti korenin, ki je dostopna za rastline. Značilnosti tal, ki vplivata na vlažnost sta predvsem tekstura oziroma velikost por in količina organske snovi (Courtney in Trudgill 1988). Zunanji dejavniki vlažnosti tal so tudi matična podlaga, relief, podnebje in pokrovnost oziroma raba tal. Vlažnost oziroma voda v tleh je v Sloveniji eden najpomembnejših dejavnikov geneze tal, ki omogočajo pomembne ekosistemske storitve (Repe 2007; Vovk Korže 2015).

Zaradi velikega pomena vode v tleh je le-ta predmet mnogih raziskav. Podatki o vlažnosti tal so pomembni v kmetijskih strokah za oceno količine pridelka, načrtovanje namakanja in predvidevanja suše. V sklopu okoljskih znanosti pa za varovanje tal, upravljanje vodnih virov in raziskave podnebnih sprememb (Bao 2018; Vani in sod. 2019). Najbolj točni podatki o vlažnosti tal so pridobljeni s terenskimi (»in situ«) in laboratorijskimi meritvami, ki so lahko finančno in časovno zahtevne. Poleg tega je zaradi velike prostorske in časovne variabilnosti vlažnosti oteženo posploševanje točkastih meritev na obsežnejše območje. Posledično se v zadnjih 30 letih na tem področju uveljavlja daljinsko zaznavanje, ki omogoča cenejše in hitrejše ugotavljanje ocene vlažnosti tal in monitoring na regionalni ravni, pri tem pa se terenske in laboratorijske meritve uporabljajo za validacijo daljinsko zaznane vlažnosti (Zenga in sod. 2004; Repe 2007; Saha in sod. 2018; Vani in sod. 2019). Za te namene je Evropska vesoljska agencija (ESA) leta 2009 izstrelila prvi vesoljski radio teleskop SMOS (ang. Soil Moisture and Ocean Salinity) za spremljanje vlažnosti tal v mikrovalovnem spektralnem kanalu s prostorsko resolucijo 35–50 km (ESA 2020). Poleg SMOS-a se uporabljajo tudi senzori drugi evropskih satelitov kot so Sentinel ali sateliti, ki jih je razvila ameriška Nacionalna zrakoplovna in vesoljska agencija (NASA) kot sta MODIS (ang. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) in Landsat 8.

Daljinsko zaznavanje vlažnosti tal obsega analizo optičnih (vidni pas med 0,43–0,67 μm , bližnji infrardeči pas med 0,85–0,88 μm , kratkovalovni infrardeči pas med 1,57–1,65 μm), termičnih (10,60 – 12,51 μm), mikrovalovnih (1–1000 mm) in hibridnih lastnosti podob (Amani in sod. 2016). Za določanje vlažnosti sta pomembna predvsem refleksija (ang. reflectance) in absorpcija (ang. absorption) tal, ki sta odvisna od njenih fizikalnih in kemijskih lastnosti. Refleksija tal narašča z valovno dolžino, tako je v infrardečem delu spektra dvakrat večja kot v vidnem, v katerem prevladuje rdeča. Pri daljinskem zaznavanju značilnosti tal je pomembna t. i. linija tal (ang. soil line), ki je opredeljena kot regresijska premica med dvema spektralnima pasovoma in je določena z enačbo:

$$\text{NIR} = \beta_1 R + \beta_0$$

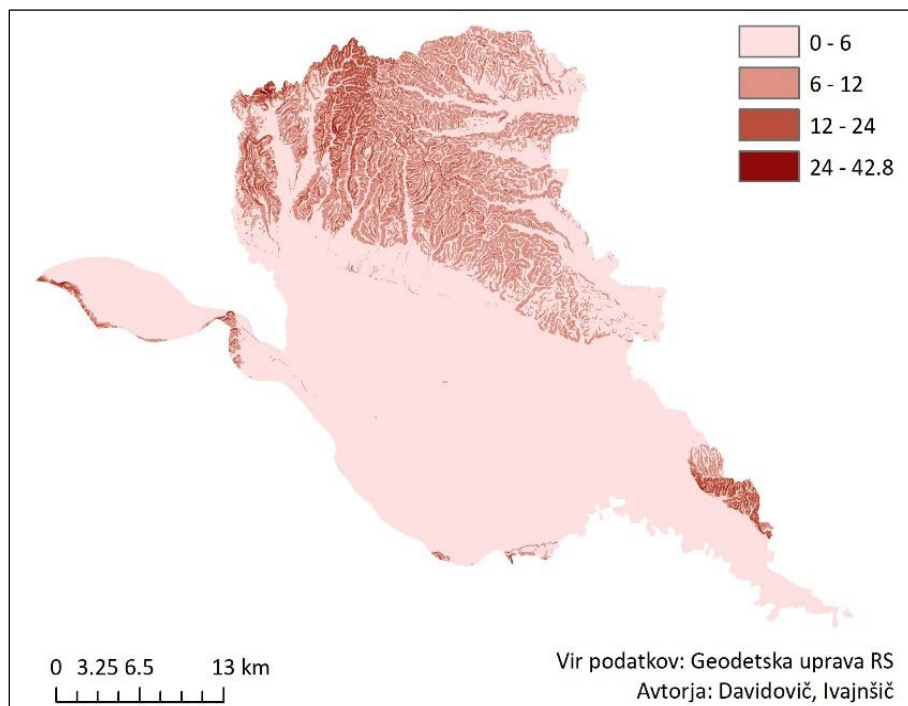
pri tem je NIR vrednost refleksije piksla v bližnjem infrardečem in R v rdečem delu spektra, β_1 smerni koeficient in β_0 začetna vrednost premice. Linija tal je odvisna od

deleža organske snovi, teksture tal, količine železovega oksida in mineralov (Ångström 1925; Fox in sod. 2004). Na refleksijo vpliva tudi vlažnost tal, ki se zmanjšuje z naraščanjem vlažnosti (Amani in sod. 2016). Absorpcijski pasovi tal so 1,4 μm in 1,9 μm . Te valovne dolžine so posledično neuporabne v daljinskem zaznavanju vlažnosti tal (Oštir 2006).

Na podlagi omenjenih dejstev so v prispevku z uporabo optičnih in termičnih podob obravnavana naslednja raziskovalna vprašanja: a) kakšna je variabilnost ocene vlažnosti tal v Pomurju, b) kje najdemo najbolj sušne ali vlažne razmere in c) kakšne so razlike v indeksu vlažnosti glede na zemljiške kategorije?

2. Območje raziskave

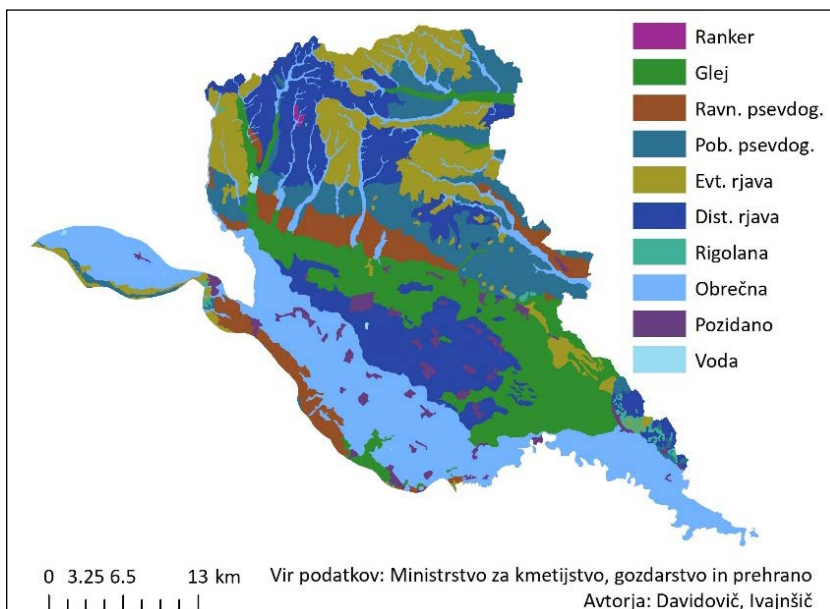
Območje raziskave je omejeno na geografske mezoregije Murska raven, Goričko in Lendavske gorice v obpanonski SV Sloveniji, ki obsegajo 1110 km² in tvorijo statistično regijo Pomurje. Absolutne nadmorske višine znašajo med 144–416 m. Proučevana regija glede na naklon, ki z naraščanjem pospešuje pretok gravitacijske talne vode in zmanjšuje vlažnost tal, obsega pretežno položnejša območja med 0–6° (76.9 %) (Slika 1).



Slika 1: Slika 1: Naklonski razredi v Pomurju.
Vir podatkov: GURS 2006.

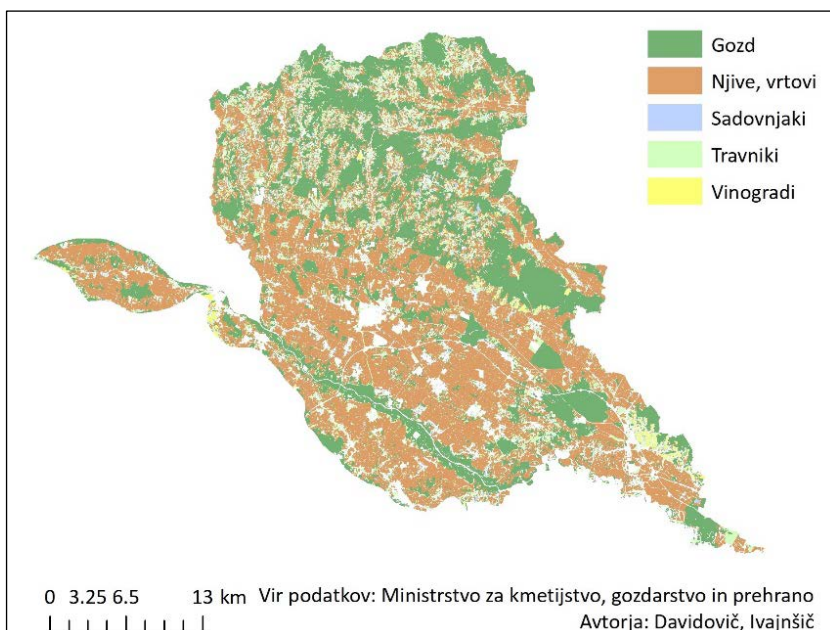
V obdobju med 1981–2010 je povprečna temperatura zraka tukaj znašala 10 °C, v enakem obdobju pa je v povprečju padlo 798 mm padavin (ARSO 2019). Posledično sodi Pomurje med najbolj sušna območja v Sloveniji. Regija spada v porečje reke

Mure, za katero je značilen snežni režim z zimskim minimumom in spomladanskim maksimumom.



Slika 2: Tipi tal v Pomurju.

Vir podatkov: MKGP 2007.



Slika 3: Izbrane zemljiške kategorije leta 2019 v Pomurju.

Vir podatkov: MKGP 2019.

Gostota rečne mreže je nadpovprečna 1,48 km/km² (DHMZ 1998). Najbolj pogosti tipi tal so psevdogleji (45,4 %), evtrična rjava tla (17,2 %) in gleji (13, 8 %). Prevladuje razred hidromorfni tal (72.7 %), ki so občasno zasičena s padavinsko, zlivno, poplavno ali talno vodo (Slika 2). Po površini so najpogostejše zemljiške kategorije njive in vrtovi (46.0 %), gozd (30.6 %) ter travniki (8.8 %) (Slika 3). Za regijo je značilen velik kmetijski potencial, vendar se intenzivne obdelovalne površine v zadnjem obdobju, v sklopu procesa ekstenzifikacije krčijo zaradi zaraščanja, ogozdovanja in pozidave (Koltai 2017).

3. Metodologija

Vlažnost tal je funkcija temperature površja (ang. Land Surface Temperature [LST]) in vegetacijskega indeksa NDVI (ang. Normalized Difference Vegetation Index), ki sta izračunana iz podatkov, pridobljenih s snemanjem satelita Landsat 8 v času 31. 8. 2019 z resolucijo piksla 30 m za optični in 100 m za termični senzor. Podatki so prosto dostopni na spletni strani Geološkega zavoda ZDA (ang. United States Geological Survey [USGS]) EarthExplorer (USGS 2020). Predobdelava podatkov oziroma izbranih spektralnih pasov je obsegala atmosfersko in radiometrično korekcijo s TerrSet modulom Landsat (Convert to reflectance, Dark object subtraction). Podatki o rabi tal v vektorski obliki za leto 2019 so pridobljeni na spletni strani Ministrstva za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano (MKGP 2019). Izbrane so intenzivne (njive, sadovnjaki, vinogradi) in bolj ekstenzivne (gozd, travniki) zemljiške kategorije. Ker kmetijska raba tal ne ločuje med intenzivnimi in ekstenzivnimi travniki, smo kategorizacijo intenzivna oziroma ekstenzivna raba tal nekoliko poenostavili in uporabili predpono bolj.

Postopek za ugotavljanje vlažnosti tal po zemljiških kategorijah v Pomurju obsega računanje indeksa vlažnosti tal (ang. Soil Moisture Index [SMI]) s trapezno metodo (Moran 1994). SMI je izračunan kot razmerje dveh temperaturnih razlik piksla s formulo (Zeng in sod. 2004):

$$SMI = \frac{(LST_{max} - LST)}{(LST_{max} - LST_{min})}$$

pri tem je LST temperatura površja v °C, ki je izračunana s TerrSet modulom Landsat iz Landsat 8 termalnih pasov 10 (TIRS 1) in 11 (TIRS 2). LST_{max} in LST_{min} pomenita najvišjo in najnižjo temperaturo površja. Vrednosti sta izračunani s formulama:

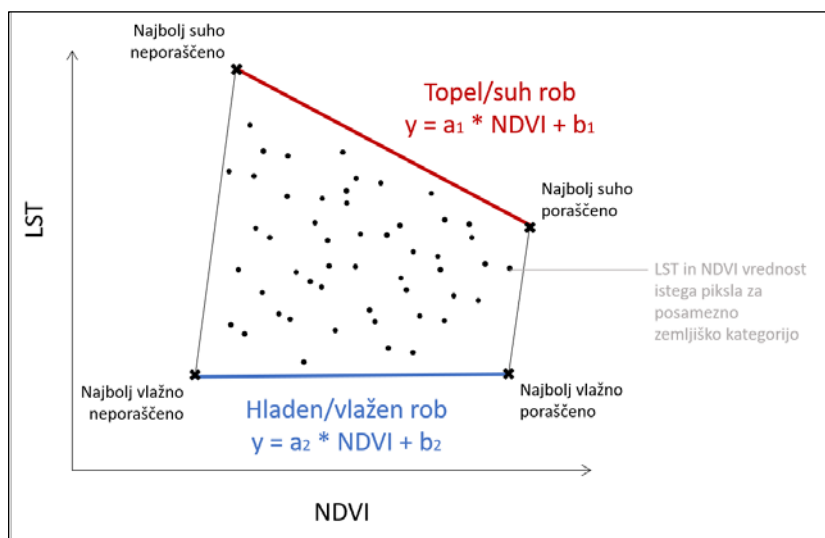
$$\begin{aligned} LST_{max} &= a_1 * NDVI + b_1 \\ LST_{min} &= a_2 * NDVI + b_2 \end{aligned}$$

pri tem sta a_1 in a_2 smerna koeficienta, b_1 in b_2 pa začetni vrednosti regresijskih premic, ki omejujeta zgornji suh ($_1$) in spodnji vlažen ($_2$) rob trapeza, ki oklepa vse točke v raztresenem grafikonu z neodvisno spremenljivko NDVI na abscisni in odvisno spremenljivko LST na ordinatni osi (Slika 4).

NDVI, ki obsega vrednosti med -1 za vodo in neporaščeno površino ter +1 za zdrav gozd, je izračunan s TerrSet modulom VegIndex na podlagi kanalov 4 (R) in 5 (NIR) satelita Landsat 8. Regresijski premici sta določeni z minimalnimi in maksimalnimi temperaturami znotraj NDVI razredov z intervalom 0,1. Za izračune so uporabljene NDVI vrednosti > 0,3. Izračunan SMI obsega vrednosti med 0 in 1, pri tem 0 pomeni nizko vlažnost tal oziroma sušne razmere zaradi nizke poraščenosti in visoke temperature površja, vrednost 1 pa zavzemajo območja z visoko vlažnostjo tal oziroma vlažnimi razmerami zaradi visoke poraščenosti in nizke temperature površja. Nadalje so izračunane vrednosti SMI primerjane med izbranimi zemljiškimi kategorijami z ANOVA statističnim preizkusom na podlagi naključnega vzorca velikosti 100 (n=100).

4. Rezultati in diskusija

Na podlagi LST vrednosti med 20,02–32,35 °C in NDVI vrednosti med 0,3–0,91 (Slika 5) ter njune korelacije ($r = 0,74$; $R^2 = 0,55$) sta izračunani enačbi regresijskih premic $LST_{max} = -1,0918 * NDVI + 33,311$ in $LST_{min} = 0,16 * NDVI + 19,771$. Za LST je značilna pozitivna korelacija z NDVI po vlažnem robu (pozitiven smerni koeficient a_2 premice LST_{min}) in negativna korelacija po suhem robu (negativen smerni koeficient a_1 premice LST_{max}), kar pomeni da z naraščanjem NDVI naraščajo minimalne temperature in padajo maksimalne temperature. Posledično se izračunane vrednosti SMI gibljejo med 0,06–0,99.



Slika 4: Trapezna metoda za določanje linearnih enačb suhega in vlažnega roba v raztresenem grafikonu za izračun LST_{max} in LST_{min} .

SMI je odvisen od teksture tal, rabe tal oziroma pokrovnosti, nadmorske višine in višine talne vode. V splošnem so višje vrednosti značilne za glinena poraščena nižje ležeča tla in nižje vrednosti za peščena neporaščena višje ležeča tla (Hassan in sod. 2019). V Pomurju se višje vrednosti SMI (bolj vlažna tla) pojavljajo predvsem v gozdovih ob Muri, na območju nižinskega poplavnega gozda Črni log, med Gornjo goščo in Obrankovskim gozdom ter v gozdnatih predelih Goričkega. Nižje vrednosti SMI (bolj sušna tla) se pojavljajo predvsem na pozidanih površinah ter na njivah in

vrtovih v okolici Murske Sobote in drugih naselij kot so Renkovci, Odranci, Moravske Toplice, Rakičan, Kobilje in Lendava (Slika 6). Vrednosti SMI pod 0,34 nakazujejo na degradacijo tal v smislu šibke »dezertifikacije« oziroma nizke vlažnosti (Zeng in sod. 2004), ki v Pomurju obsegajo 1247 ha (1,1 %). Kljub območjem z zelo nizko vlažnostjo tal, lahko pričakujemo, da se bodo na površinah, na katerih je že zaznaven proces ekstenzifikacije oziroma širjenja ekstenzivnih zemljiških kategorij, vrednosti SMI v Pomurju višale. Seveda bi za potrditev te hipoteze potrebovali časovni niz satelitskih podob in meritve na terenu.

Nadalje so ugotovljene razlike v vrednostih SMI po izbranih zemljiških kategorijah. Najnižja minimalna vrednost SMI je značilna za njive (0,06), najvišja minimalna pa za gozd in vinograde (0,29). Najnižja maksimalna vrednost SMI je značilna za vinograde (0,83), najvišja pa za gozd (0,98). Največja amplituda oziroma razlika med minimalno in maksimalno vrednostjo SMI je značilna za njive (0,87), najmanjša pa za vinograde (0,54). Najvišja povprečna vrednost SMI je značilna za gozd (0,8), najmanjša pa za njive in sadovnjake (0,61). Največja variabilnost je značilna za njive ($\sigma = 0,11$), najmanjša pa za gozd ($\sigma = 0,06$). Opazne so večje razlike v vrednosti SMI med gozdom in ostalimi zemljiškimi kategorijami, medtem ko se povprečne vrednosti SMI med ostalimi zemljiškimi kategorijami manj razlikujejo (razpon povprečnih vrednosti med 0,61–0,63).

Na podlagi naključnega vzorca ($n = 100$) so z analizo ANOVA testirane razlike v vrednostih SMI po zemljiških kategorijah ($\alpha = 0,05$; $p < \alpha$). Tukey in Tamhane post hoc preizkusa sta potrdila razlike med vsemi zemljiškimi kategorijami, z izjemo njiv in sadovnjakov, njiv in vinogradov ter sadovnjakov in vinogradov. Tako na obravnavanem območju, po pričakovanju, obstajajo statistično signifikantne razlike v vlažnosti tal (SMI) med intenzivnimi (njive, sadovnjaki, vinogradi) ter ekstenzivnimi (gozd, travniki) kmetijskimi površinami.

Tabela 1: Opisna statistika vzorcev za vrednosti SMI.

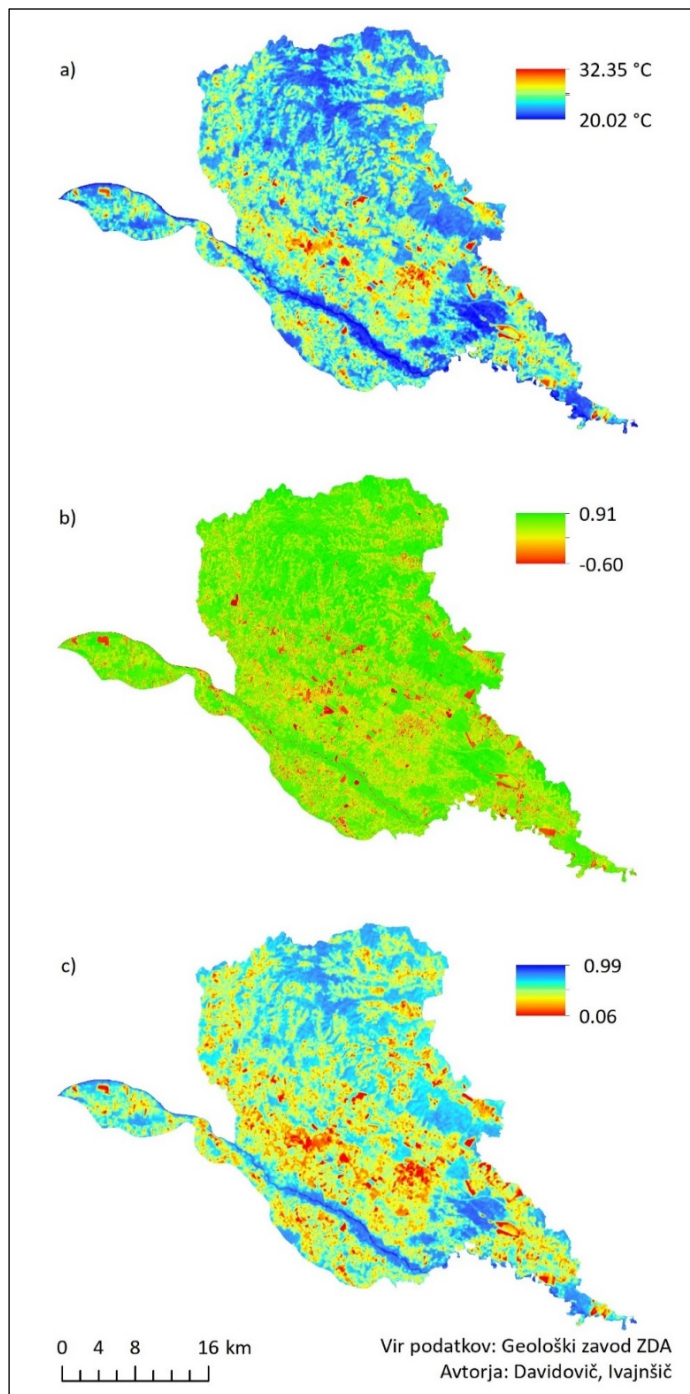
Zemljiške kategorije	Obseg vzorca	Vsota	Povprečje	Varianca	Standardni odklon
Gozd	100	80,03	0,80	0,00	0,07
Njive, vrtovi	100	62,67	0,63	0,01	0,11
Sadovnjaki	100	61,13	0,61	0,01	0,08
Travniki	100	57,49	0,57	0,01	0,09
Vinogradi	100	62,91	0,63	0,01	0,08

Vir podatkov: USGS 2020.

Tabela 2: Povzetek ANOVA preizkusa.

ANOVA	Vsota kvadratov	Stopinje prostosti	Povprečje kvadratov	F vrednost	P-vrednost	F kritična vrednost
Med skupinami	3.069	4	0.767	101.919	< 0,01	3.357
Znotraj skupin	3.727	495	0.008			
Brown-Forsythe		4		101.919	< 0,01	

Vir podatkov: USGS 2020.



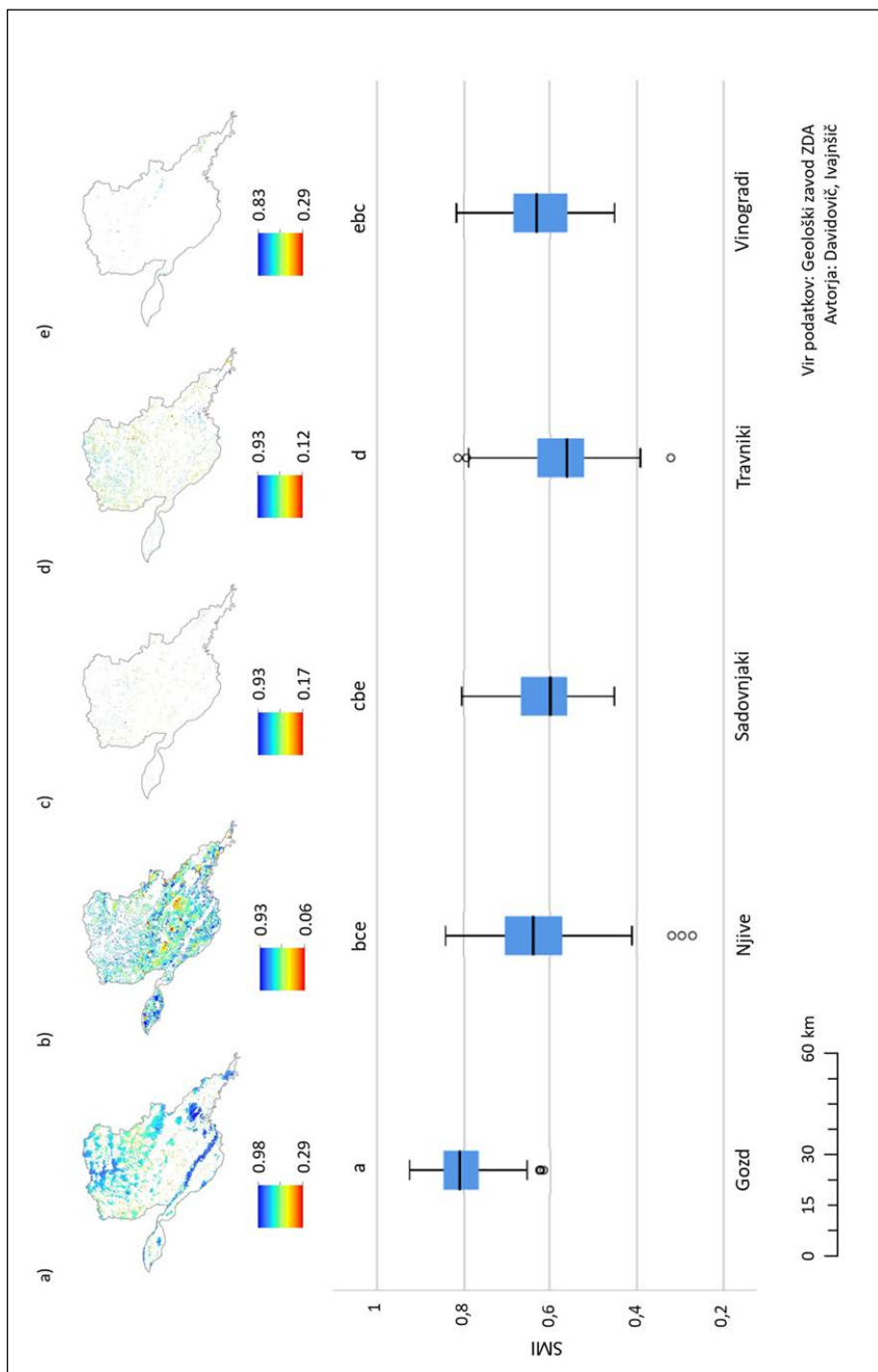
Slika 5: a) temperatura površja LST, b) vegetacijski indeks NDVI in c) indeks vlažnosti tal SMI v Pomurju.

Vir podatkov: USGS 2020.

Točnost SMI je ugotovljena z validacijo podatkov oziroma korelacijo izračunanega indeksa z rezultati gravimetričnih meritev, ki sega od zmerno močne ($R^2 = 0,61$) (Hassan in sod. 2019) do močne ($R^2 = 0,81$) (Mohamed in sod. 2019) skladnosti med izračunanimi in dejanskimi vrednostmi. Kljub visoki korelaciji se pri uporabi tovrstne metode pojavljajo omejitve. Izračunane vrednosti nakazujejo vlažnost tal le v zgornjem horizontu oziroma do globine 10 cm (Zhang in sod. 2015). Prav tako metoda ne upošteva advekcije zraka in drugih meteoroloških kazalcev, hrapavosti površine, vsebnosti organske snovi ter globine in teksture tal, ki pomembno vplivajo na količino vode v tleh in lahko otežijo monitoring oziroma primerjanje vrednosti skozi čas (Zhan in sod. 2007). Rezultati so lahko netočni tudi zaradi slabo definiranega suhega in vlažnega roba v raztresenem grafikonu (Mohseni in Mokhtarzade 2020). Za metodo so značilne tudi omejitve v močno fragmentiranih regijah z raznovrstnimi zemljiškimi kategorijami (Mohamed in sod. 2019), kar je, med drugim, značilno tudi za Pomurje. Točnost se navadno izboljša s postopki validacije podatkov s terenskimi in laboratorijskimi meritvami.

SMI vpliva na genezo tal, pokrovnost, evapotranspiracijo in količino pridelka (Mohamed in sod. 2019), zato imajo tovrstni rezultati kljub temu lahko veliko aplikativno vrednost. Uporabni so za ugotavljanje pH in slanosti tal (Ghazali in sod. 2019), ugotavljanje višine talne vode (Hassan in sod. 2019), proučevanje suše in poplav v kmetijstvu (Spennemann in sod. 2020), načrtovanje namakanja v kmetijskih regijah (Mohamed in sod. 2019), proučevanje degradacija tal zaradi prekomerne namočenosti oziroma poplavljanja (Hassan in sod. 2019) in dezertifikacije (Zeng in sod. 2004), prostorsko-časovni monitoring okolja obsežnih regij (Vani in sod. 2019) ter proučevanje ekohin sodologije in zelene infrastrukture v mestih (Alizadehtazi in sod. 2020). Z daljšo časovno vrsto SMI vrednosti pa lahko proučujemo in prognoziramo (modeliramo) tudi bodoče učinke podnebnih sprememb na ciljno pokrajino.

Za izboljšanje daljinsko zaznane ocene vlažnosti tal je potreben kompleksen in podatkovno integriran pristop, ki obravnava več ustreznih podatkovnih baz ko so SMOS, MODIS, Sentinel in ostali. Predvsem slednji imajo veliko vrednost v kmetijstvu oziroma za spremljanje (monitoring) implementacijskih ukrepov Skupne kmetijske politike (SKP). Evropski sateliti iz programa Copernicus Sentinel 1 (dva satelita z radarskim senzorjem) in Sentinel 2 (dva satelita z optičnim in infrardečim senzorjem) od marca 2017 zagotavljajo prosto dostopne posnetke visoke prostorske in časovne ločljivosti. Poleg proučevanja vlažnosti tal in omenjenih aplikativnih vrednosti so Sentinel podatki uporabni za spremljanje urejanja površin, ki so vpete v sistem neposrednih kmetijskih plačil, identifikacijo pridelkov brez inšpekcijskih pregledov na terenu, spremljanje kmetijskih praks na parcelah kot sta obdelava in košnja, ugotavljanje navzkrižne skladnosti ter skladnosti in smotrnosti podnebnih in okoljskih zahtev (ERS 2020). Ohranjanje tal je eden izmed temeljnih ciljev SKP, zato lahko SMI in druge možne uporabe daljinskega zaznavanja pomembno prispevajo k bolj sonaravnem kmetijstvu in krepitvi prehranske varnosti.



Slika 6: Indeks vlažnosti tal SMI za a) gozd, b) njive in vrtove, c) sadovnjake, d) travnike in e) vinograde v Pomurju.
Vir podatkov: USGS 2020.

5. Zaključek

Vlažnost tal pomeni količino vode v tleh in predstavlja enega najpomembnejših dejavnikov rabe tal ter prehranske varnosti. Čeprav so meritve vlažnosti tal najbolj točne s terenskimi in laboratorijskimi metodami, se zaradi večjega prostorskega obsega ter finančne in časovne varčnosti vse bolj uporabne tudi metode daljinskega zaznavanja. V raziskavi je uporabljena satelitska podoba optičnega in termičnega senzorja satelita Landsat 8 za računanje indeksa vlažnosti tal v Pomurju. Na podlagi temperature površja in vegetacijske indeksa NDVI so s trapezno metodo ugotovljene vrednosti SMI, ki se gibljejo med 0,06–0,99. Najvišjo povprečno vrednost SMI ima gozd (0,8), najnižjo pa njive in sadovnjaki (0,61).

Z analizo ANOVA so ugotovljene razlike v vrednostih SMI med intenzivnimi (njive, sadovnjaki, vinogradi) ter bolj ekstenzivnimi (gozd, travniki) kmetijskimi površinami, pri tem je za slednje značilna višja vlažnost tal. V splošnem je v Pomurju zaradi širjenja ekstenzivnih površin možno pričakovati višanje vlažnosti tal. Identificirana so tudi, zaradi zelo sušnih razmer, degradirana tla, ki v Pomurju obsegajo 1247 ha (1,1 %). Z daljšo časovno vrsto podatkov bi lahko prognozirali njihovo širjenje v prihodnosti.

Vlažnost in druge značilnosti tal so lahko zadovoljivo določene z daljinskim zaznavanjem, kar je lahko v praksi dodana vrednost za kmetovalce, odločevalce, lokalne skupnosti in okolje.

Literatura

- Alizadehtazi, B., Gurian, P. L., Montalto, F. A., 2020: Observed Variability in Soil Moisture in Engineered Urban Green Infrastructure Systems and Linkages to Ecosystem Services. *Journal of Hydrology*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169420308416>
- Amani, M., Parsian, S., MirMazloumi, S. M., Aieneh O., 2016: Two new soil moisture indices based on the NIR-red triangle space of Landsat-8 data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 50.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0303243416300496?via%3Dihub>
- Ångström, A., 1925: The Albedo of Various Surfaces of Ground. *Geografiska Annaler* 7:4. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/20014422.1925.11881121>
- ARSO 2019: Podnebni diagrami, Murska Sobota.
<http://meteo.arso.gov.si/met/sl/climate/diagrams/murska-sobota/>
- Bao, Y., Lina, L., Wua, S., Deng, K. A. K., Petropoulos, G. P., 2018: Surface soil moisture retrievals over partially vegetated areas from the synergy of Sentinel-1 and Landsat 8 data using a modified water-cloud model. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 72.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0303243418303015?via%3Dihub>
- CORINE 2018: CORINE Land Cover. <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>
- Courtney, F. M., Trudgill, S. T., 1988: *The Soil: An introduction to soil study*.
- DHHMZ 1998: *Površinski vodotoki in vodna bilanca Slovenije*.
- ERS 2020: Posebno poročilo: Uporaba novih tehnologij zajemanja posnetkov za spremljanje skupne kmetijske politike: na splošno stalen napredek, vendar počasnejši pri spremljanju podnebja in okolja.

- <https://op.europa.eu/webpub/eca/special-reports/new-tech-in-agri-monitoring-4-2020/sl/>
- ESA 2020: What is SMOS? <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/smos>
- Fox, G. A., Sabbagh, G. J., Searcy, S. W., Yang, C., 2004: An Automated Soil Line Identification Routine for Remotely Sensed Images. *Soil Science Society of America Journal* 68.
<https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssaj2004.1326>
- Ghazali, M. F., Wikantika, K., Harto, A. B., Kondoh, A., 2019: Generating soil salinity, soil moisture, soil pH from satellite imagery and its analysis. *Information Processing in Agriculture*.
- GURS 2006: Digitalni model višin 25. <https://www.e-prostor.gov.si/zbirke-prostorskih-podatkov/topografski-in-kartografski-podatki/digitalni-model-visin/digitalni-model-visin-z-locljivostjo-dmv-125-dmv-25-dmv-100/#tab1-1046>
- Hassan, A. M., Belal, A. A., Hassan, M. A., Farag, F. M., Mohamed, E. S., 2019: Potential of thermal remote sensing techniques in monitoring waterlogged area based on surface soil moisture retrieval. *Journal of African Earth Sciences* 155.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1464343X19301128>
- Koltai, T., 2017: Naravnogeografski potenciali za kmetijstvo v Pomurski statistični regiji in spremembe rabe tal v obdobju 2000–2017. *Revija za geografijo* 12-1.
- Kovačič, E., 1966: Hin sodotehnične melioracije del 2: Tla in voda.
- MKGP 2007: Pedologija Grafični in pisni podatki Pedološke karte in pedoloških profilov. <https://rkg.gov.si/vstop/>
- MKGP 2018: RABA Grafični podatki za celo Slovenijo. <https://rkg.gov.si/vstop/>
- Mohseni, F., Mokhtarzade, M., 2020: A new soil moisture index driven from an adapted long-term temperature-vegetation scatter plot using MODIS data. *Journal of Hydrology*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169419311552>
- Moran, M. S., Clarke, T. R., Inoue, Y., Vidal, A., 1994: Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sensing of Environment* 49, 3.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0034425794900205>
- Repe, B., 2007: Voda v prsti in ugotavljanje njenega razporejanja v odvisnosti od reliefa. *Dela* 28.
- Saha, A., Patil, M., Goyal, V. C., Rathore, D. S., 2018: Assessment and Impact of Soil Moisture Index in Agricultural Drought Estimation Using Remote Sensing and GIS Techniques.
- Spennemann, P. C., Fernández-Long, M. E., Gattinoni, N. N., Cammalleri, C., Naumann, G., 2020: Soil moisture evaluation over the Argentine Pampas using models, satellite estimations and in-situ measurements. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 31.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221458182030197X>
- SURS 2018: Pomurska regija. <https://www.stat.si/obcine/sl/Region/Index/1>
- http://www.arso.gov.si/vode/publikacije%20in%20poro%C4%8Dila/bilanca6190_2_BESEDILO.pdf
- USGS 2020: EarthExplorer. <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Vani, V., Pavan Kumar, K., Ravibabu, M. V., 2019: Temperature and Vegetation Indices Based Surface Soil Moisture Estimation: A Remote Sensing Data Approach. Rao, P. J. in sod. (ur.), *Proceedings of International Conference on Remote Sensing for Disaster Management*.
- Vovk Korže, A., 2015: Ekosistemski pristop za razumevanje prsti v geografiji. *Revija za geografijo* 10-1.

- Zeng, Y., Feng, Z., Xiang, N., 2004: Assessment of soil moisture using Landsat ETM+ temperature/vegetation index in semiarid environment.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/1370089>
- Zhan, Z., Qin, Q., Ghulan, A., Wang, D., 2007: NIR-red spectral space based new method for soil moisture monitoring. Science in China Series D: Earth Sciences volume 50. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11430-007-2004-6>
- Zhang, J., Yang, J., Lu, H., Wu, W., Huang, J., Chang, S., 2015: Subwavelength TE/TM grating coupler based on silicon-on-insulator. Infrared Physics & Technology 71.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350449515001553>

SOIL MOISTURE INDEX IN POMURJE: AN EXAMPLE OF LANDSAT 8 SATELLITE DATA USE

Summary

This research demonstrates the methodological implementation of satellite imagery for evaluation of soil moisture in the case of Pomurje (Slovenia). Soil moisture is defined as the amount of water in the soil and represents one of the most important factors in the energy and material flows of ecosystems. At the same time, it is one of the most important factors in crop cultivation and food security. Soil characteristics that affect moisture are soil texture, land use or land cover, altitude and groundwater level. In general, higher values are characteristic of clay overgrown lower-lying soils and lower values for sandy bare higher-lying soils (Hassan et al. 2019).

The most accurate data for soil moisture assessment are obtained with field and laboratory measurements, which can be expensive and time-consuming. In addition, it is difficult to generalize point measurements to a larger area. Therefore, remote sensing is being applied, because it enables cheaper and faster assessment of soil moisture and monitoring at the regional level. Remote sensing of soil moisture includes analysis of optical, thermal, microwave and hybrid images (Amani et al. 2016). Using optical and thermal images, the paper addresses the following research questions: a) what is the variability of soil moisture assessment in Pomurje, b) where are the driest and wettest conditions and c) what are the differences in soil moisture index according to land categories?

The research area is limited to the geographical mesoregions Murska raven, Goričko and Lendavske gorice in the Subpannonian NE Slovenia, which cover 1110 km². Absolute altitudes are between 144–416 m, and slopes between 0–6 ° (76.9%) (Figure 1). The average air temperature is 10 ° C, and the amount of precipitation is 798 mm (ARSO, 2019). The region belongs to the Mura river basin with nival river regime. Drainage density of the river is above average 1.48 km/km² (DHMZ, 1998). The most common soil types are planosols (45.4%), eutric cambisols (17.2%) and gleysols (13.8%). The class of hydromorphic soils, which are occasionally saturated with precipitation, stormwater, flood or groundwater, predominates (72.7%) (Figure 2). The most common land categories are fields and gardens (46.0%), forest (30.6%) and meadows and pastures (8.8%) (Figure 3). The region is characterized by great agricultural potential, but intensive arable land has recently been shrinking as part of the extensification process (Koltai, 2017).

Soil moisture is a function of Land Surface Temperature LST and Normalized Difference Vegetation Index NDVI, which were calculated from data obtained by Landsat 8 satellite on 31. 8. 2019 with a pixel resolution of 30 m for optical and 100 m for thermal sensor. Soil Moisture Index (SMI) was determined using the trapezoidal method (Moran 1994) and formula (Zeng et al. 2004):

$$SMI = \frac{(LST_{max} - LST)}{(LST_{max} - LST_{min})}$$

$$LST_{max} = a_1 * NDVI + b_1$$

$$LST_{min} = a_2 * NDVI + b_2$$

where a_1 and a_2 are the slope, and b_1 and b_2 are the intercept of the regression lines in the scattered plot with the independent variable NDVI and the dependent variable

LST (Figure 4). NDVI was calculated with the TerrSet module VegIndex based on bands 4 (R) and 5 (NIR). The regression lines are determined by the minimum and maximum temperatures within the NDVI classes with an interval of 0.1. NDVI values > 0.3 were used for the calculations. The calculated SMI ranges from 0 to 1, where 0 means low soil moisture or dry conditions due to low vegetation cover and high surface temperature, and the value 1 indicates areas with high soil moisture or wet conditions due to high vegetation cover and low surface temperature.

Based on LST values between 20.02–32.35 ° C and NDVI values between 0.3–0.91, the calculated SMI values in Pomurje range between 0.06–0.99. LST is characterized by a positive correlation with NDVI along the wet edge and a negative correlation along the dry edge, so as NDVI increases, minimum temperatures increase and maximum temperatures decrease. In Pomurje, higher SMI values (wetter soils) are mainly in the forests along the river Mura, in the area of the lowland floodplain forest Črni log, between Gornja gošča and Obrankovski gozd, and in the forested areas of Goričko. Lower SMI values (drier soils) are mainly in built-up areas and in fields and gardens in the vicinity of Murska Sobota and other settlements such as Renkovci, Odranci, Moravske Toplice, Rakičan, Kobilje and Lendava (Figure 6).

SMI values below 0.34 indicate soil degradation in terms of weak "desertification" or low moisture (Zeng et al. 2004), which in Pomurje cover 1247 ha (1.1%). The selected region is also characterized by the process of extensification, so we can expect that the values of SMI in Pomurje will increase in the areas of expansion of extensive land use categories.

Furthermore, the calculated SMI values were compared between selected land use categories based on a random sample of size 100 ($n = 100$). Land use data in vector form for 2019 were obtained on the website of the Ministry of Agriculture, Forestry and Food (MKGP 2019). Intensive (fields and gardens, orchards, vineyards) and more extensive (forest, meadows and pastures) land categories were selected. The highest average SMI value is typical for forest (0.8, $\sigma = 0.06$), and the lowest for fields and gardens (0.61, $\sigma = 0.11$) and orchards (0.61, $\sigma = 0.08$). Based on a random sample, differences in SMI values by land categories were tested with ANOVA test ($\alpha = 0.05$; $p < \alpha$). The Tukey's and Tamhane's post hoc tests confirmed differences between all land categories, with the exception of fields and orchards, fields and vineyards, and orchards and vineyards. Thus, there are statistically significant differences in soil moisture (SMI) between intensive (fields and gardens, orchards, vineyards) and extensive (forest, meadows) agricultural land use categories, as was expected.

The accuracy of SMI is determined by correlation of the calculated index with gravimetric measurements, ranging from moderately strong ($R^2 = 0.61$) (Hassan et al. 2019) to strong ($R^2 = 0.81$) (Mohamed et al. 2019). Despite the high correlation, there are limitations to using this methodology. The calculated values indicate soil moisture only in the upper horizon up to a depth of 10 cm (Zhang et al. 2015). The method also does not take into account the advection of air and other meteorological indicators, surface roughness, organic matter content and soil depth and texture, which significantly affect the amount of water in the soil and can make it difficult to monitor or compare values over time (Zhan et al. 2007). The results may also be inaccurate due to the poorly defined dry and wet edge in the scatter plot (Mohseni and Mokhtarzade 2020). The method is also characterized by restrictions in highly fragmented regions with diverse land use categories (Mohamed et al. 2019), which is also characteristic of Pomurje.

SMI affects soil genesis, landcover, evapotranspiration and crop yield (Mohamed et al. 2019), so despite mentioned disadvantages, such methodologies can have great application value in agricultural and environmental sciences. With a longer timeseries of SMI values, we can also study and forecast (model) the future effects of climate change in specific region. Soil conservation is also one of the fundamental objectives of the CAP, so SMI and other remote sensing products can make an important contribution to more sustainable agriculture and food security.

