

ZAZNAVANJE IN KARTIRANJE INVAZIVNIH TUJERODNIH RASTLINSKIH VRST S SATELITSKIMI POSNETKI SENTINEL-2

Ana Smerdu

Center odličnosti VESOLJE-SI

ana.smerdu@space.si, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3482-9891>

Urša Kanjir, dr. Žiga Kokalj

ZRC SAZU, Inštitut za antropološke in prostorske študije

Center odličnosti VESOLJE-SI

ursa.kanjir@zrc-sazu.si, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1332-5624>

ziga.kokalj@zrc-sazu.si, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1712-0351>

DOI: https://doi.org/10.3986/9789610504696_06

UDK: 528.8:581.96(497.4Ljubljana)

IZVLEČEK

Zaznavanje in kartiranje invazivnih tujerodnih rastlinskih vrst s satelitskimi posnetki Sentinel-2
Pristotnost invazivnih tujerodnih rastlinskih vrst v urbanih območjih je postala stalnica po vsem svetu. Le te se lahko širijo zelo hitro in negativno vplivajo na ekosisteme, v katere vstopajo. Mestne uprave si prizadevajo, da bi se izognile pretirani prevladi takšnih rastlinskih vrst, tako da jih izkoreninjajo in nadzorujejo ali pa jih predelajo v uporabne izdelke. Za opazovanje širjenja invazivnih vrst na nekem območju, jih je treba spremljati in kartirati. V okviru projekta APPLAUSE smo razvili pristopa za zaznavanje invazivnih rastlinskih vrst s pomočjo metode podpornih vektorjev (SVM) in naključnih gozdov (RF) na satelitskih posnetkih Sentinel-2. Kot vhodne podatke uporabljamo rdeče-zelene-modre kanale, dodatno pa še normirani diferencialni vegetacijski indeks (NDVI) in izboljšan indeks vegetacije (EVI).

KLJUČNE BESEDE

daljinsko zaznavanje, strojno učenje, metoda podpornih vektorjev, metoda odločitvenih dreves, fenologija, japonski dresnik

ABSTRACT

Detection and mapping of invasive non-native plant species using Sentinel-2 satellite images

Presence of invasive alien plant species in urban areas has become a regularity throughout the globe. These plants can quickly spread and negatively affect the ecosystems that they enter. City administrations are making efforts to avoid the overpopulation of such invasions by eradicating and/or controlling such species, or alternatively, try to process them into useful products. To monitor the spread of species over a region, it is important to monitor and map them. In the scope of the APPLAUSE project, we have developed a One-Class support vector machine (SVM) approach and Random Forest (RF) classification to detect invasive species on Sentinel-2 satellite images. As input data, the proposed approaches use red-green-blue bands, and additionally normalized difference vegetation index (NDVI) and enhanced vegetation index (EVI).

KEY WORDS

remote sensing, machine learning, Support Vector Machine, Random Forest, phenology, Japanese knotweed

1 Uvod

Prepoznavanje, zaznavanje in kartiranje invazivnih tujerodnih rastlinskih vrst postaja prioriteta v urbanih območjih po vsem svetu, saj invazivne vrste izpodrivajo avtohtono rastje. To lahko negativno vpliva na obstoječe ekosisteme in počutje ljudi. Terenske izmere so še vedno najpogosteje uporabljen pristop pri zagotavljanju prostorskih informacij, čeprav so pogosto povezane z visokimi terenskimi stroški in le delnim pokrivanjem pokrajine (Crosier in Stohlgren 2004). Zahvaljujoč razpoložljivosti visoko ločljivih satelitskih podatkov se daljinsko zaznavanje vse pogosteje uporablja za preučevanje in modeliranje širjenja invazivnih rastlinskih vrst (Müllerová s sodelavci 2017). Daljinsko zaznavanje ima zato pomembno, a omejeno vlogo pri odkrivanju in kartiranju invazivnih rastlin, saj lahko s to tehnologijo hitro in celovito opazujemo velika območja. Invazivne rastlinske vrste lahko uspešno zaznavamo, dokler le te kažejo značilne posebnosti v primerjavi z okoliškimi avtohtonimi vrstami (Huang in Asner 2009). Njihovo zaznavanje pa je veliko bolj zahtevno in predstavlja veliko večji izziv v gozdovih oziroma pod krošnjami dreves. Prav tako je večje sestoje, kjer so invazivne vrste očitno dominantna vrsta in kjer je okoljska heterogenost zmanjšana, iz posnetkov lažje zaznati (Lass s sodelavci 2005) kot samostojne rastline manjšega obsega. Poleg tega se zaznava izboljša, če imajo opazovane rastlinske vrste poudarjene fenološke lastnosti, ki se razlikujejo od avtohtonega rastja (Evangelista s sodelavci 2009).

Izbira in primernost podob daljinskega zaznavanja za kartiranje rastja je določena s številnimi dejavniki. Izbrati moramo posnetke, ki zagotavljajo dovolj primerno prostorsko pokritost ciljnega območja, imajo dovolj visoko prostorsko ločljivost za opazovanje ciljnih objektov, imajo primerno spektralno ločljivost (širina pasov valovnih dolžin), ki nam dajejo vpogled v sezonskost opazovanega rastja ter nimajo visokih stroškov pridobivanja (Cuneo, Jacobson in Leishman 2009). V naši študiji uporabljamo satelitske posnetke Sentinel-2. Ker lahko do posnetkov iste lokacije na Zemlji z njimi dostopamo vsakih nekaj dni oziroma tednov, lahko območja, ki nas zanimajo, redno spremljamo. Z uporabo časovno gostih posnetkov, se lahko izognemo težavam pri zaznavanju invazivnih vrst na eni sami podobi, kjer nekaterih tujerodnih rastlinskih vrst ni mogoče prepoznati zaradi razlik v njihovem življenjskem ciklu v primerjavi z okoliškim rastjem (Müllerová s sodelavci 2017). Poleg časovne spremenljivke je pomembna tudi velikost enote, ki jo zaznavamo. En sam slikovni element (ali piksel) namreč ne nosi dovolj pomembnih informacij za natančno določitev, kje se invazivne tujerodne rastlinske vrste nahajajo. Zato moramo za relevantno analizo opazovati dovolj veliko območje sestojev invazivnih rastlin. To je tudi glavna omejitev pri zaznavanju različnih vrst invazivnih tujerodnih rastlin s satelitskih posnetkov.

Spektralni odboj posameznega tipa rastja (krošnji dreves, travnikov, kmetijskih zelenih površin in tako dalje), ki ga zaznavajo sateliti, se s časom in glede na sezono spreminja. Invazivne rastlinske vrste imajo specifičen spektralni podpis, ki je sicer zelo podoben ostali zeleni vegetaciji, saj močno absorbirajo valovanje v rdečem in modrem delu spektra, medtem ko odbijajo zeleno in bližnjo infrardečo svetlobo. Kljub temu je njihov spektralni odboj toliko drugačen, da ga lahko iz posnetka z zapletenimi algoritmi ločimo od ostalih rastlinskih vrst. Za pridobivanje informacij o razvoju rastja se navadno uporabljajo vegetacijski indeksi, ki jih izračunamo iz razmerij oziroma razlik satelitskih spektralnih kanalov in odražajo predvsem stanje klorofila v rastlinah.

Cilj te študije je določiti prostorski obseg japonskega dresnika (*Fallopia japonica*) v Mestni občini Ljubljana, čeprav so na preučevanem območju v veliki meri prisotne tudi druge invazivne vrste (na primer kanadska in orjaška zlata rozga, octovec, orjaški dežen, topinambur, veliki pajesen in tako dalje). Japonski dresnik tvori izrazite, goste sestoje in je zato primerna vrsta za zaznavanje invazivnih rastlinskih vrst s pomočjo satelitskih posnetkov, obenem pa je po mnenju Müllerove s sodelavci (2017) tudi težko prepoznavna, saj je težko ločljiva od okoliškega rastja. Obstoječi večji sestoji japonskega dresnika imajo dokaj značilen vzorec pojavljanja; na brežinah vodotokov, ob prometnicah, na gradbiščih in zapuščenih zemljiščih. Ti sestoji se na posnetku drugače prikazujejo pozimi ali poleti, saj se aktivnost klorofila v listih močno spreminja med rastno dobo. Prav tako se sestoji v istem časovnem obdobju nahajajo v različnih fazah rasti, ki je odvisna od ravni talne vode, sončne lege in tako dalje. Za lažje

zaznavanje japonskega dresnika in vključitev vseh naštetih časovnih spremenljivk, uporabljamo posnetke iz različnih časovnih obdobj. Analitiki temu pravimo, da uporabljamo podatke časovnih vrst in z njimi torej opazujemo pojavnost japonskega dresnika skozi čas. V študiji se osredotočamo na zaznavo invazivnih rastlinskih vrst s pomočjo metode strojnega učenja SVM (angleško *Support Vector Machine*) oziroma metode podpornih vektorjev. Metoda SVN je nadzorovana statistična metoda, razvita za ravnanje bodisi z binarnimi ali z večrazrednimi razvrstitvami (Vapnik 2006), v daljinskem zaznavanju pa se uporablja predvsem za klasifikacijo pikselov ali objektov v razrede. Metoda je osredotočena na razdelitev učnih primerov v razrede tako, da je ravnina med posameznimi razredi največja. Različne ocene kakovosti metode kažejo, da je algoritem sposoben opisati razrede z majhnim številom učnih vzorcev, ne da bi pri tem izgubili na natančnosti same zaznave (Bruzzone, Chi in Marconcini 2006; Zheng s sodelavci 2015). Druga metoda, ki smo jo razvili v ta namen, pa temelji na klasifikaciji RF (*Random Forest*). Ta metoda sestavi določeno število odločitvenih dreves, ki z glasovanjem razvrstijo piksele (slikovne točke) ali objekte v izbrane razrede.

Ko sestojе na posnetku enkrat zaznamo, natančnost določitev območij pojavljanja invazivnih rastlinskih vrst ocenimo z uporabo referenčnih terenskih podatkov. Satelitski posnetki in terenske meritve so med seboj sicer težko neposredno primerljivi, saj so slednji lahko zelo spremenljivi in jih pogosto opazujemo na majhnih območjih, nam pa vseeno dajejo grobo sliko razmerij med njimi. Z vidika načrtovanja ukrepov in nadzora invazivnih tujerodnih vrst, je večje število lažno zaznanih poligonov bolj zaželen problem kot pa večje število spregledanih poligonov.

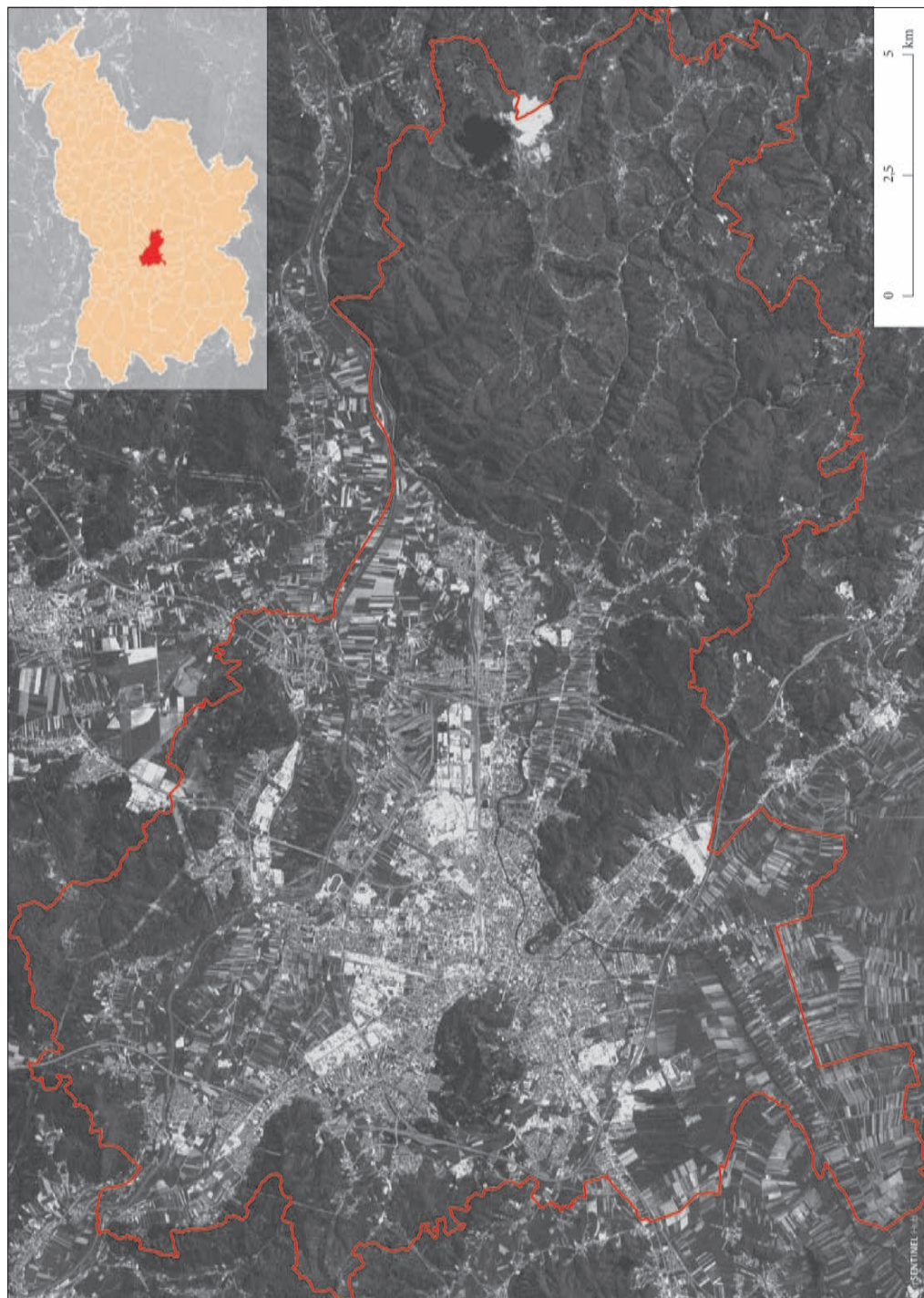
2 Metode dela in podatki

Preučevano območje je Mestna občina Ljubljana (MOL; slika 1), ki obsega 257 km² in je največja izmed enajstih mestnih občin v Sloveniji. Znotraj občine v 38 naseljih živi 292.988 prebivalcev (2019). Mestna občina Ljubljana leži v Ljubljanski kotlini, ob sotočju reke Ljubljanice in Save. V Mestni občini Ljubljana se mestne oblasti trudijo spremljati, nadzorovati in izkoreniniti invazivne rastlinske vrste. Mesto je študijski primer za reševanje izziva invazivnih tujerodnih rastlinskih vrst s pomočjo inovativne prakse z aktivno udeležbo občanov v sklopu projekta *APPLAUSE (Urban Innovative Actions initiative)*, v okviru katerega je bila ta študija tudi opravljena.

Za zaznavanje invazivnih rastlinskih vrst smo uporabili prosto dostopne optične satelitske posnetke senzorja Sentinel-2. Satelit je del misije za opazovanje Zemlje evropskega programa *Copernikus*, ki ga vodi Evropska vesoljska agencija (ESA) in zajema podatke površja Zemlje ter obalnih območij v visoki prostorski in časovni ločljivosti. Na Sentinel-2 so vgrajeni optični senzorji za zajem vidne, bližnje infrardeče in kratkovalovne infrardeče svetlobe, ki zagotavljajo podatke v 13 različnih intervalih valovnih dolžin s prostorsko ločljivostjo 10 m, 20 m ali 60 m (Veljanovski, Švab Lenarčič in Oštir 2014). Širina pasu snemanja je 290 kilometrov, kar v kombinaciji s kratkim ponovnim časom obiska omogoča spremljanje hitrih, nenadnih sprememb, kot tudi rastne cikle rastlinstva.

Za zaznavanje invazivnih vrst smo iz platforme *Sentinel Hub* (Sentinel Hub 2019) pridobili posnetke (*Level-1C S-2*) iz leta 2018, na katerih je bila oblačnost manjša od 10 %. Vsi posnetki, ki nosijo 10 m prostorsko ločljivost, so bili pred analizo predhodno atmosfersko obdelani s procesno verigo *STORM* (Pehani s sodelavci 2016), katere del so med drugim samodejni atmosferski popravki, narejeni s programom *ATCOR* (Richter in Schlapfer 2016). Poleg rdečega, zelenega in modrega kanala smo pridobili še indeksa *NDVI* (normirani diferencialni vegetacijski indeks) in *EVI* (*enhanced vegetation index*). *NDVI* je kazalnik aktivnosti rastja na zemeljski površini in je relativno in posredno merilo količine

Slika 1: Mestna občina Ljubljana – preučevano območje zaznave invazivnih tujerodnih rastlinskih vrst. Grafična podlaga predstavlja posnetek Sentinel-2 (SentinelHub, posnet aprila 2018), z vektorjem meje ljubljanske občine (GURS 2019). ► (str. 90)



fotosintetske biomase. Računa se ga kot razmerje med bližnje infrardečim (NIR) in rdečim (R) spektralnim kanalom, oziroma v primeru uporabe Sentinel-2 posnetka kot razmerje med osmim in četrtem spektralnim kanalom:

$$NDVI = \frac{(\text{kanal } 8 - \text{kanal } 4)}{(\text{kanal } 8 + \text{kanal } 4)}.$$

EVI ima podobno vlogo kot NDVI in ga je mogoče uporabiti za količinsko opredelitev vegetacijske zelenosti. Prav tako je bolj občutljiv na območjih z gostim rastjem (Matsushita s sodelavci 2007). EVI se za posnetke Sentinel-2 računa z naslednjo formulo:

$$EVI = \frac{2.5 \cdot (\text{kanal } 8 - \text{kanal } 4)}{(\text{kanal } 8 + (2.4 \cdot \text{kanal } 4) + 1)}.$$

Terenske podatke sestojev japonskega dresnika smo uporabili kot učne (in testne) vzorce za strojno učenje. Kot že omenjeno, mora biti velikost sestoja japonskega dresnika, najdenega na terenu, dovolj velika, da lahko na satelitskih posnetkih izvedemo analizo, zato so bili uporabljeni vsi terenski podatki (poligoni) s površino večjo od 100 m². Za lažje zaznavanje sestoj ne sme ležati pod krošnjami drugega rastja in mora biti kar se da homogen, torej naj se ne bi nahajal v kombinaciji z drugim rastjem. V sklopu projekta *APPLAUSE* biologi redno zbirajo terenske podatke invazivnih tujerodnih vrst v Mestni občini Ljubljana. Prav tako je za območje celotne Slovenije razvita aplikacija *Invazivke* (Spletni ... 2019), kjer lahko dostopamo do javnih podatkov o nahajališčih invazivnih rastlinskih vrst, med drugim tudi do nahajališč japonskega dresnika. Poleg že omenjenih virov podatkov, ki so predstavljali učne vzorce, smo pri razvoju samodejnega algoritma uporabili tudi terenske podatke, ki so jih zbrali strokovnjaki za daljinsko zaznavanje. Ti podatki so se izkazali kot najbolj primerni za strojno učenje, saj so osredotočeni na značilnosti (velikost, obliko sestojev, razpršenost), ki odlikujejo kakovostne terenske vzorce, primerne za analize na satelitskih posnetkih.

Za prepoznavanje japonskega dresnika smo razvili dva postopka, ki uporabljata različni metodi strojnega učenja. Prvi postopek temelji na uporabi enorazredne metode podpornih vektorjev oziroma tudi imenovane klasifikacije SVM (*OneClass – Support Vector Machine*). Vhodne podatke predstavljajo poljubno število satelitskih posnetkov z vidnim spektrom (rdeči-zeleni-modri kanali) ter indeksa NDVI in EVI, izračunana iz njihovih razmerij, dodatno pa tudi terenski podatki o nahajališčih japonskega dresnika. Parametre, ki so potrebni za klasifikacijo SVM, smo nastavili s pomočjo iskanja po mreži, kjer pregledamo vse možne kombinacije izbranih parametrov. Ta metoda se je izkazala za primernejšo izbiro kot metoda, ki uporablja genetski algoritem. Kot rezultat nam postopek vrne razvrščene piksele, ki so bodisi prepoznani kot dresnik bodisi kot ostalo. Drugi postopek temelji na posplošeni metodi odločitvenih dreves oziroma RF (*Random Forest*). Vhodni podatki so v primeru te metodologije identični kot v primeru SVM, razlikuje se le izbira terenskih meritev, saj moramo tukaj v nasprotju od prejšnjega postopka zagotoviti učne vzorce ne samo za japonski dresnik, temveč tudi za vzorce več različnih razredov rabe tal (na primer gozdovi, travniki, njive, pozidani predeli). Za slednje smo uporabili Evidenco dejanske rabe kmetijskih in gozdnih zemljišč (2018) Ministrstva za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano. Rezultat pri tem so piksli, razvrščeni v razrede, za katere smo zagotovili učne vzorce. Prednost metode RF je, da lahko en sam model naučimo prepoznavati različne tujerodne invazivne rastline, medtem ko pri metodi SVM potrebujemo za vsako rastlinsko vrsto posebej naučen model za prepoznavanje določene vrste.

3 Prve izkušnje pri klasifikaciji

V prispevku želimo prikazati možnosti zaznave invazivnih tujerodnih rastlinskih vrst s prosto dostopnimi satelitskimi posnetki. Osnova za dobro prepoznavanje in pridobivanje informacij ciljnih objektov

so oblika, barva, vzorci in tekstura, ki jih lahko dobimo iz posnetka. Kot primer zaznave invazivnih tujerodnih rastlinskih vrst smo podrobneje obravnavali japonski dresnik in ostale vrste iz družine dresnikov, saj so zaradi svoje pojavnosti primerna študijska vrsta za razvoj algoritmov na satelitskih posnetkih. Kljub temu pa njegova zaznava ni nedvoumna. Dresnik namreč tvori goste sestoje, ki so precej podobni okoliškemu rastju, kar je zaradi relativno nizke ločljivosti posnetkov Sentinel-2 in glede na velikost sestojev še dodatno oteženo. Ključna razlika med japonskim dresnikom in večino ostalega rastja je nekoliko poznejši začetek rastne sezone dresnika (slika 2). Na podlagi te informacije lahko ločimo dresnik od ostalega rastja na časovno gostih podatkih (Müllerová s sodelavci 2017).

Obe zgoraj opisani metodi za zaznavo invazivnih rastlin sta močno odvisni od kakovosti učnih vzorcev. Že same lastnosti satelitskih posnetkov (na primer prostorska ločljivost), nas omejujejo pri velikosti najmanjših še zaznanih sestojev (vsaj 100 m²) in njihovi obliki. Zaradi nepopolne geometrične poravnosti časovno različnih satelitskih posnetkov, ki se lahko zamaknejo tudi za 1 piksel (10 m), je nemogoče zaznavati ozke sestoje ob cestah in rekah.

Točnost rezultatov je odvisna tudi od izbire in števila vhodnih posnetkov Sentinel-2. Večje število posnetkov iz naših opazovanj ne pomeni tudi večje natančnosti, temveč je za boljšo natančnost pomembnejša ustrezna izbira datumov satelitskih posnetkov. Najboljše rezultate smo dobili s štirimi posnetki (21. januar, 11. april, 10. junij in 17. november 2018), ki so bili zajeti pred začetkom rastne sezone, med začetkom rastne sezone ostalega rastja in začetkom rastne sezone japonskega dresnika, po začetku rastne sezone dresnika in po koncu rastne sezone japonskega dresnika. Na sliki 3 so prikazani zaznani sestoji japonskega dresnika z obema predstavljenima metodama (SVM in RF). Pri vizualnem pregledu smo ugotovili, da so zaznani vsi večji sestoji, vendar v različnih deležih. Glavna razlika med rezultati obeh metod se kaže pri napačnih zaznavah, kar lahko napeljuje, da bi za izboljšavo končnih rezultatov, vzeli neke vrste prirejen presek rezultatov, ki jih posamezni metodi vrmeta za različne vhodne podatke. Z metodo SVM smo zaznali približno 90 % vseh prisotnih območij dresnika, z metodo RF pa je izdelovalčeva natančnost celotne klasifikacije med 91 % in 97 % (odvisno od vhodnih podatkov).

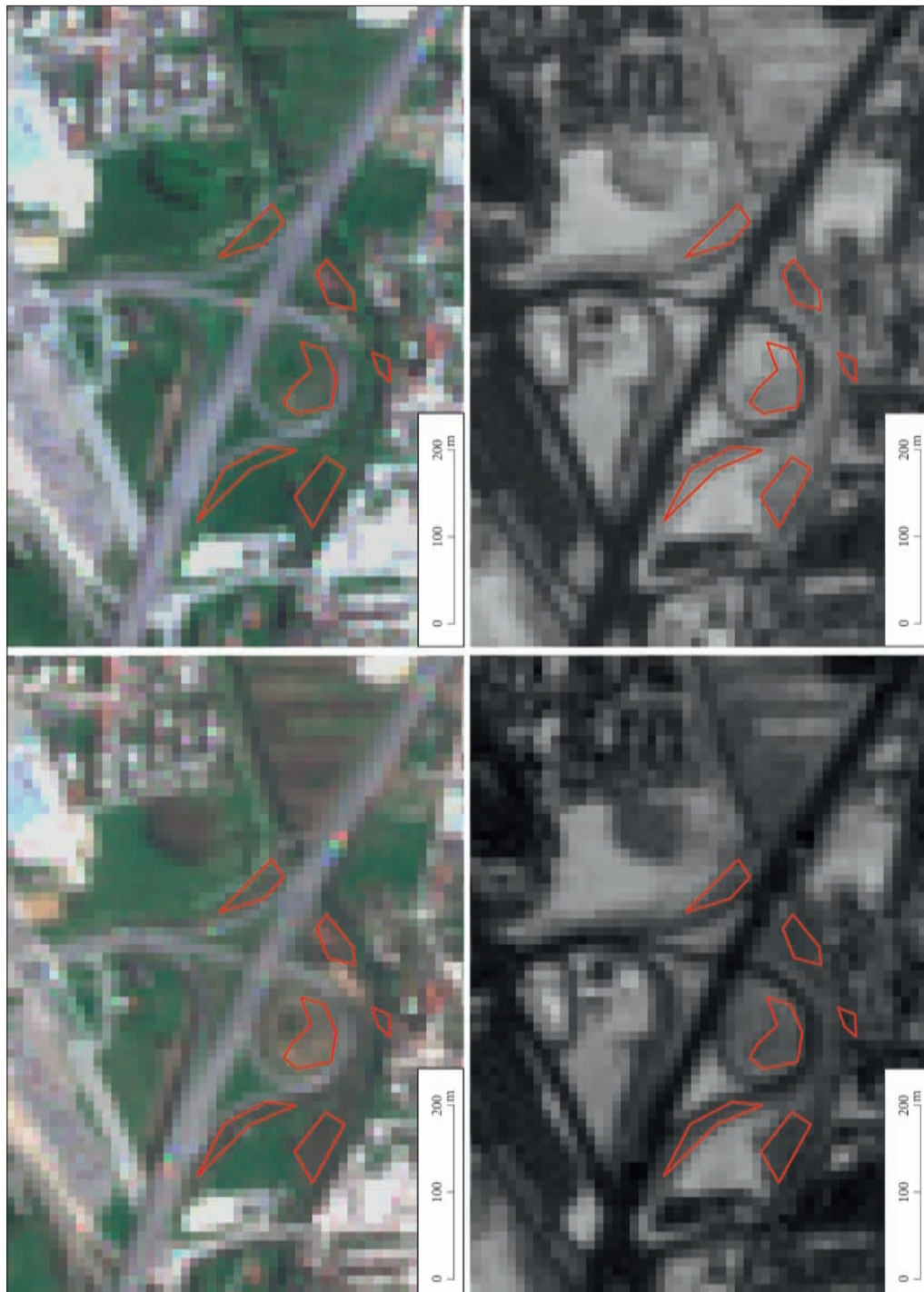
Na območju Mestne občine Ljubljana so se že izvajale podobne študije (Đurić 2011; Dorigo s sodelavci 2012), kjer so s pomočjo objektno usmerjene klasifikacije prepoznavali japonski dresnik na letalskih posnetkih (prostorska ločljivost < 1m).

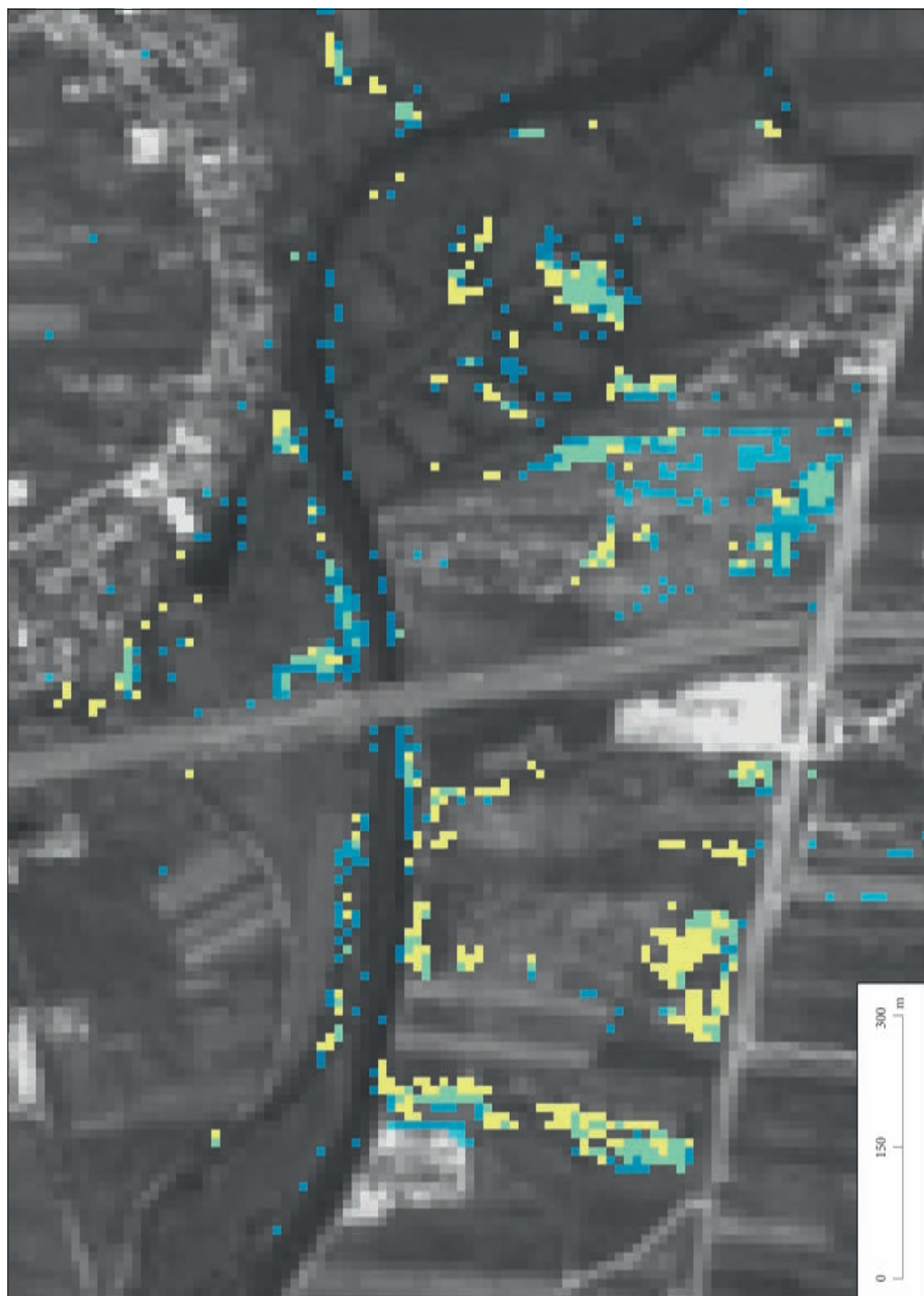
Na splošno nam lahko zemljevidi lokacij in obsega tujerodnih invazivnih rastlinskih vrst, pridobljeni iz podatkov daljinskega zaznavanja, dajo dober pregled nad prostorsko razporeditvijo invazivnih vrst, nam pomagajo razumeti njihov vpliv na okolje, omogočajo stroškovno učinkovito upravljanje ter prizadevanje za preprečevanje njihovega nadaljnega širjenja in nenazadnje večajo ozaveščenost med meščani. Predstavljeni pristop je primeren za zaznavo invazivnih vrst v zgodnjih fazah razvoja tudi na drugih, večjih urbanih območjih (občinah), kjer razpolagamo s terenskimi podatki.

ZAHVALA: Raziskavo sta sofinancirali Evropski sklad za regionalni razvoj s pobudo Urban Innovative Action (UIA) v okviru projekta APPLAUSE ter Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije v okviru raziskovalnega programa številka P2-0406 Opazovanje Zemlje in geoinformatika in temeljnega raziskovalnega projekta številka J6-9395. Informacije in stališča odražajo izključno stališča avtorjev. Pobuda UIA ne odgovarja zanje niti za njihovo uporabo. Hvala recenzentom za konstruktivne komentarje.

Slika 2: Japonski dresnik pred (levo zgoraj RGB, spodaj NDVI, posnetek 11. 4. 2018) in po (desno zgoraj RGB, spodaj NDVI, posnetek 21. 4. 2018) začetku rastne sezone. Rastna sezona ostalega rastja v okolici se je začela pred datumom levega posnetka. ►

Slika 3: Prepoznani sestoji japonskega dresnika z metodo RF (rumena barva) in SVM (modra barva). Piksli, ki so bili prepoznani z obema metodama, so prikazani v turkizni barvi. ► (str. 94)





4 Viri in literatura

- Bruzzone, L., Chi, M., Marconcini, M. 2006: A novel transductive SVM for semisupervised classification of remote sensing images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 44-11. DOI: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.877950>
- Crosier, C. S., Stohlgren, T. J. 2004: Improving biodiversity knowledge with dataset synergy: A case study of non-native plants in Colorado. *Weed Technology* 18-1. DOI: [https://doi.org/10.1614/0890-037X\(2004\)018\[1441:IBKWDS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1614/0890-037X(2004)018[1441:IBKWDS]2.0.CO;2)
- Cuneo, P., Jacobson, C. R., Leishman, M. R. 2009: Landscape-scale detection and mapping of invasive African olive (*Olea Europaea* L. ssp. *cuspidata* Wall Ex G. Don Ciferri) in SW Sydney, Australia using satellite remote sensing. *Applied Vegetation Science* 12-2. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1654-109X.2009.01010.x>
- Dorigo, W., Lucieer, A., Podobnikar, T., Čarni, A. 2012: Mapping invasive *Fallopia japonica* by combined spectral, spatial, and temporal analysis of digital orthophotos. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 19. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.05.004>
- Đurić, N. 2011: Objektno usmerjena klasifikacija za določanje drevesnih vrst in zaznavanje japonskega dresnika. Diplomsko delo, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. Ljubljana.
- Evangelista, P. H., Stohlgren, T. J., Morisette, J. T., Kumar, S. 2009: Mapping invasive tamarisk (*Tamarix*): A comparison of single-scene and time-series analyses of remotely sensed data. *Remote Sensing* 1-3. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs1030519>
- Evidenca dejanske rabe kmetijskih in gozdnih zemljišč. Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano. Ljubljana, 2018.
- Huang, C. Y., Asner, G. P. 2009: Applications of remote sensing to alien invasive plant studies. *Sensors* 9-6. DOI: <https://doi.org/10.3390/s90604869>
- Lass, L. W., Prather, T. S., Glenn, N. F., Weber, K. T., Mundt, J. T., Pettingill, J. 2005: A review of remote sensing of invasive weeds and example of the early detection of spotted knapweed (*Centaurea maculosa*) and babysbreath (*Gypsophila paniculata*) with a hyperspectral sensor. *Weed Science* 53-2. DOI: <https://doi.org/10.1614/WS-04-044R2>
- Matsushita, B., Yang, W., Chen, J., Onda, Y., Qiu, G. 2007: Sensitivity of the Enhanced Vegetation Index (EVI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to topographic effects: A case study in high-density cypress forest. *Sensors* 7-11. DOI: <https://doi.org/10.3390/s7112636>
- Müllerová, J., Brůna, J., Bartaloš, T., Dvořák, P., Vítková, M., Pyšek, P. 2017: Timing is important: Unmanned aircraft vs. satellite imagery in plant invasion monitoring. *Frontiers in Plant Science* 8-887. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00887>
- Pehani, P., Čotar, K., Marsetič, A., Zaletelj, J., Oštir, K. 2016: Automatic geometric processing for very high resolution optical satellite data based on vector roads and orthophotos. *Remote Sensing* 8-4. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs8040343>
- Richter, R., Schlapfer, D. 2016: Atmospheric / Topographic correction for satellite imagery (ATCOR-2/3 User Guide, Version 9.0.2). Medmrežje: https://www.dlr.de/eoc/en/Portaldata/60/Resourcen/dokumente/5_tech_mod/atcor3_manual_2012.pdf (18. 11. 2019).
- Sentinel Hub, 2019. Medmrežje: <https://www.sentinel-hub.com/explore/eobrowser> (18. 11. 2019).
- Spletni portal Invazivke, 2019. Medmrežje: <https://www.invazivke.si/> (22. 11. 2019).
- Vapnik, V. 2006: Estimation of dependences based on empirical data. *Information Science and Statistics*. New York. DOI: <https://doi.org/10.1007/0-387-34239-7>
- Veljanovski, T., Švab Lenarčič, A., Oštir, K. 2014: Sateliti Sentinel – vesoljska komponenta Evropskega programa za opazovanje Zemlje Copernicus. *Geodetski vestnik* 58-3.
- Zheng, B., Myint, S. W., Thenkabail, P. S., Aggarwal, R. M. 2015: A Support Vector Machine to identify irrigated crop types using time-series Landsat NDVI data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.07.002>