

DOLOČEVANJE FENOLOŠKIH FAZ IZBRANIH DREVESNIH VRST S ČASOVNIMI VRSTAMI POSNETKOV MODIS

DETERMINING PHENOLOGICAL PHASES OF SELECTED TREE SPECIES WITH MODIS TIME-SERIES DATA

Urška Kanjir, Mitja Skudnik, Žiga Kokalj

UDK: 528.7:8.551.506.8:519.172.1
Klasifikacija prispevka po COBISS.SI: 1.01
Prispelo: 5. 2. 2023
Sprejeto: 24. 5. 2023

DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2023.02.165-180
SCIENTIFIC ARTICLE
Received: 5. 2. 2023
Accepted: 24. 5. 2023

IZVLEČEK

V študiji smo preučili uporabnost satelitskih posnetkov MODIS (angl. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) za določevanje začetka, konca in dolžine rastne sezone izbranih drevesnih vrst listavcev. Vegetacijski indeksi, pridobljeni iz satelitskih posnetkov, zagotavljajo konsistentna opazovanja v podobnem časovnem zaporedju in so primerni za določevanje fenoloških faz. Z uporabo časovnih vrst vegetacijskega indeksa NDVI (normiran diferencialni vegetacijski indeks) iz posnetkov MODIS smo zaznavali fenološke vzorce na več točkah po Sloveniji in med seboj primerjali različne pristope določevanja sezonskih faz. Pridobljene sezonske faze smo primerjali s terenskimi fenološkimi in meteorološkimi podatki. Ugotovili smo, da je uspešnost določevanja fenoloških faz na podlagi satelitskih posnetkov odvisna od mnogih vplivov: prostorske ločljivosti satelitskih podatkov, izbire metode glajenja časovnih vrst podatkov, izbire metode določevanja fenoloških parametrov in izbire terenskih podatkov za primerjavo. Rezultati študije kažejo, da fenološke faze, pridobljene s satelitskimi posnetki MODIS ločljivosti 250 m, najbolje sovpadajo s fenološkimi podatki, ki jih vodi Gozdarski inštitut Slovenije z uporabo metode srednje sezonske vrednosti.

KLJUČNE BESEDE

listna fenologija, sezonske faze, časovne vrste, NDVI, MODIS

ABSTRACT

This study investigates the usefulness of MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) satellite imagery for determining the start, end, and length of the growing season of selected deciduous tree species. Vegetation indices derived from satellite imagery provide consistent observations in a similar temporal sequence and are useful for determining phenological phases. Using time series of NDVI (Normalised Difference Vegetation Index) vegetation index from MODIS imagery, phenological patterns were detected at several points in Slovenia and different approaches to determine seasonal phases were compared. In addition, the derived seasonal phases with field phenological and meteorological data were also compared. It has been found that the success of determining phenological phases from satellite imagery depends on many factors: the spatial resolution of the satellite data, the smoothing method for the time series data, the method for determining phenological parameters, and the field data used for comparison. The results of the study show that phenological phases determined by using MODIS data with a resolution of 250 m best match the phenological data maintained by the Slovenian Forestry Institute using the mean seasonal values method.

KEY WORDS

leaf phenology, seasonal phases, time series, NDVI, MODIS

1 UVOD

Podatki daljinskega zaznavanja imajo velik potencial za spremljanje dinamike oziroma fenologije rasta, predvsem na večjih območjih. Fenologija je znanstvena disciplina, ki proučuje zakonitosti periodičnih pojavov v razvojnem ciklu rastlin in živali ter ugotavlja njihovo odvisnost od sezonskih in letnih nihanj podnebnih dejavnikov (Žust et al., 2016). Podatki daljinskega zaznavanja ponujajo prav to – ponavljajoča opazovanja, kar omogoča boljše razumevanje časovnih in prostorskih dinamik ekosistemov (Sjöström et al., 2011). Analize fenologije vegetacije s tehnikami daljinskega zaznavanja so večinoma osredotočene na vsebnost klorofila v rastlinah, zato opazujemo sezonske spremembe spektralnih in biofizikalnih indeksov. Takšne analize uporabljamo za ugotavljanje stanja rastlinskega pokrova, iz katerega lahko razberemo različne stresne razmere (bolezni, sušo, žled), za načrtovanje kmetijske pridelave in kmetijskih del ali za spremljanje sprememb v biološki raznovrstnosti (Žust et al., 2016). Prav tako se spremenljivost vegetacijskega pokrova kaže kot posledica sprememb rabe tal oziroma pokrovnosti in podnebnih ali kakšnih drugih sprememb (Heumann et al., 2007). Opis rastne sezone zajema predvsem določitev fenoloških faz, kot sta na primer začetek in konec rastne sezone. Fenološke faze so odvisne od vrste vegetacije, ki jo opazujemo, od podnebja, torej temperature zraka, padavin, trajanja sončnega obsevanja ipd. Širok nabor fenoloških faz so opredelili Baumann et al. (2017), ključne fenološke razvojne faze v rastni sezoni pa so:

1. olistanje ali datum začetka fotosintetske dejavnosti,
2. zrelost oziroma datum, ko je površina listov na rastlinah največja,
3. splošno rumenenje oziroma datum, ko začne vrednost klorofila v listih padati.

Z določevanjem fenoloških faz na podlagi satelitskih posnetkov se je ukvarjalo že več raziskovalnih skupin (glej npr. Eklundh in Jönsson, 2017; Garonna et al., 2016; Vrieling et al., 2018; Wessels et al., 2011; Zhang et al., 2003). Vsak senzor ima edinstveno kombinacijo prostorske in časovne ločljivosti, najpogosteje pa se za fenološka opazovanja rastlin uporabljajo visokoločljivi senzor MSI na satelitih Sentinel-2, različni srednjeločljivi senzorji (MSS, TM, ETM+, OLI) na satelitih Landsat in srednjeločljivi senzor MODIS na satelitih Aqua in Terra (Gonsamo et al., 2012; Bolton et al., 2020; Younes et al., 2021). K temu pomembno prispevajo zlasti njihova prosta dostopnost in časovna razpoložljivost. Nekatere študije obravnavajo fenologijo rastlin z uporabo agregiranih letnih podatkov (Kowalski et al., 2020), druge pa preučujejo fenologijo skozi desetletja (Garonna et al., 2016; Melaas et al., 2018). Količina podatkov posameznega senzorja je odvisna od števila satelitov, na katerih je nameščen, njihove razporeditve v tirnici ter širine pasu snemanja, uporabnost podatkov pa je odvisna tudi od stopnje oblačnosti. Zaporedne posnetke daljšega obdobja imenujemo časovna vrsta satelitskih posnetkov.

Goste časovne vrste so ključne za spremljanje in preučevanje vegetacije in njenih sprememb skozi rastno sezono. Dinamika vegetacije je odvisna od vrste vegetacije in letnega časa in se na časovnih vrstah satelitskih posnetkov, oziroma njihovih vegetacijskih indeksov, kaže s spreminjanjem vrednosti – na primer vrednosti vegetacijskih indeksov listnatega gozda spomladi naraščajo, dosežejo vrhunec poleti in v začetku jeseni začnejo padati. Za natančne izračune se morajo posamezni podatki v časovnih vrstah pojavljati v čim stalnejšem časovnem zaporedju. Gostejši kot so satelitski podatki, natančneje lahko definiramo fenološke faze.

Na kakovost informacij, ki jih pridobimo iz satelitskih posnetkov, zelo vpliva stanje v ozračju, na primer meglice in oblačnost, kar pogosto povzroči šum v podatkih. Za fenološke študije je treba torej pred

analizo časovne vrste zgladiti oziroma posplošiti. Za popravljanje in glajenje podatkov časovnih serij in podporo za oceno fenoloških faz obstaja obilica tehnik za glajenje (na primer drseče sredine, asimetrična Gaussova funkcija, filtriranje Savitzky-Golay), vendar še vedno ni dokončnih dokazov o prednosti ene metode pred drugimi (Cai et al., 2017). Izbira modela je odvisna od namena študije in narave podatkov.

S satelitskimi podatki lahko opazujemo fenologijo posameznih rastlinskih vrst, vendar so te ocene manj natančne kot neposredna terenska opazovanja, ki pa so običajno omejena na majhna območja oziroma posamezna drevesa in daljše časovne intervale med posameznimi opazovanji. V študiji smo uporabili posnetke sensorja MODIS (angl. *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) s prostorsko ločljivostjo 250 metrov. Zagotavljajo nam dolgo in gosto časovno vrsto, saj lahko podatke v časovnem razmiku osem dni pridobimo za obdobje od leta 2000 naprej. Ker se pri modeliranju fenologije s podatki daljinskega zaznavanja običajno uporabljajo vegetacijski indeksi, kot je na primer NDVI (normiran diferencialni vegetacijski indeks), smo za analize uporabili NDVI produkt MODIS podatkov. NDVI je približek produktivnosti vegetacije in je ključnega pomena pri spremljanju različnih globalnih vegetacijskih procesov in dinamike vegetacije skozi čas (Zhu et al., 2016).

Namen te študije je bil raziskati zanesljivost satelitskih posnetkov za določevanje ključnih fenoloških faz v primerjavi z meritvami, pridobljenimi na terenu, in primerjati več različnih algoritmov za določevanje fenoloških faz iz vegetacijskih indeksov. Določili smo ključne fenološke faze: začetek, konec in dolžino rastne sezone, pri čemer je slednja opredeljena s številom dni med začetnim in končnim datumom. Za opredelitev fenoloških faz iz satelitskih posnetkov v posamezni rastni sezoni smo uporabili različne pristope (lastno razvit pristop v programskem jeziku R in uveljavljeno programsko orodje) in rezultate med seboj primerjali, da smo ugotovili njihovo ustreznost na obravnavanem območju. Dobljene rezultate različnih pristopov določevanja fenoloških matrik smo primerjali z referenčnimi, terenskimi (in situ) podatki. Uporabili smo fenološke podatke za gozdove, ki nam jih je posredoval Gozdarski inštitut Slovenije (GIS), fenološke podatke za lipo ter meteorološke podatke, oba niza podatkov je zagotovila Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO). V študiji smo uporabili tudi programski paket TIMESAT (Jönsson in Eklundh, 2004), ki je široko uporaben za analizo časovnih vrst satelitskih podatkov za določevanje dinamike vegetacije, kot sta fenologija in časovni razvoj. Uporabili smo ga na podlagi dejstva, da izbira ene same tehnike za določevanje fenoloških faz ni preprosta. Različne metode pogosto dajejo različne ocene trendov, čeprav temeljijo na istih podatkih, ter nasprotujoče si rezultate glede območij pojavljanja ozelenitev ali obarvanja vegetacije (Wessels et al., 2011). Poleg izbire metod tudi ni enoznačnih opredelitev fenoloških faz in lahko njihove definicije med strokami različno odstopajo.

2 METODE

2.1 Uporabljeni podatki

V analizi smo uporabili satelitske in terenske podatke.

Satelitski podatki sensorja MODIS

Za oceno vegetativnih fenoloških faz smo uporabili posnetke MODIS oziroma zbirko produktov NDVI od leta 2000 do vključno leta 2018. Skupaj je uporabnih 812 podob NDVI za območje cele Slovenije.

Senzor MODIS opazuje Zemljo v vidnem in infrardečem območju elektromagnetnega spektra s prostorsko ločljivostjo med 250 in 1000 metri. Zelo pogosta snemanja (vsaka dva dni z ločljivostjo 1000 m) in dobri atmosferski popravki zagotavljajo primerne podatke za študije vegetacije (Zhang et al., 2003).

Za analizo smo uporabili vegetacijski indeks NDVI, ki je izdelan kot 16-dnevno povprečje podatkov v prostorski ločljivosti 250 m. NDVI smo izbrali, ker ima močno povezavo z zeleno biomaso in je pogosto uporabljen za opazovanje vegetacije s sateliti (Tucker, 1979). NDVI za količinsko opredelitev gostote rastlinskega pokrova uporablja odbito sevanje v bližnji infrardeči (IR) in vidni rdeči valovni dolžini. Izražen je, kot je prikazano v enačbi (1):

$$NDVI = \frac{\text{bližnji IR kanal} - \text{rdeč kanal}}{\text{bližnji IR kanal} + \text{rdeč kanal}} \quad (1)$$

Vrednosti NDVI se gibljejo med -1 in 1 , pri čemer višje vrednosti kažejo na večjo fotosintetsko aktivnost (Sellers, 1985). Oblaki in slabe atmosferske razmere običajno znižujejo vrednosti NDVI (Chen et al., 2004) in povzročijo nenadne padce vrednosti v časovnih vrstah, ki jih obravnavamo kot šum in jih moramo odstraniti iz časovnega niza s tehnikami glajenja (Pettorelli et al., 2005). Običajna praksa je, da se uporabijo matematične funkcije za zgladitev krivulje časovne vrste satelitskih posnetkov in da se tako zagotovijo neprekinjeni podatki, uporabni za modeliranje fenologije (Noumonvi et al., 2021). Cai et al. (2017) so testirali več metod za glajenje časovnih vrst MODIS NDVI (npr. Savitzky-Golay, lokalna obtežena regresija, zlepki, asimetrična Gaussova funkcija, dvojna logistična funkcija) in ugotovili, da vse metode zmanjšajo šum na posnetkih in izboljšajo kakovost opazovanj, vendar nobena ne deluje vedno bolje kot druge.

Terenski podatki

Terenske podatke smo uporabili za preverbo ustreznosti fenoloških faz, ki smo jih pridobili s satelitskimi posnetki MODIS. Uporabili smo naslednje nize referenčnih podatkov, ki so zbrani na terenu ali izračunani iz talnih meritev:

- fenološki podatki Agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO)

Vir: Arhiv fenoloških podatkov, ARSO.

ARSO beleži faze fenološkega razvoja za različne rastlinske vrste. Za analizo smo izbrali podatke lipe (*Tilia platyphyllos*) za obdobje 2000–2018. Za to drevesno vrsto beležijo čas prvega olistanja (začetek rastne sezone), čas splošnega rumenenja in splošnega odpadanja listov (konec rastne sezone). Podatki lokacije so vezani na posamezno drevo, ki običajno stoji v radiju enega kilometra od zabeleženih koordinat, izjemoma tudi več.

- fenološki podatki Gozdarskega inštituta Slovenije (GIS)

Vir: Gozdarski inštitut Slovenije.

Fenološki podatki o začetku in koncu rastnih sezon za izbrane drevesne vrste, ki jih zbira Gozdarski inštitut Slovenije, so zbrani na drevesih, ki spadajo v mrežo vseevropskega programa ICP (angl. *International Co-operative Programme on the Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests*) Level II, katerega namen je dolgoročno intenzivno spremljanje ploskev za boljše razumevanje učinkov onesnaženosti zraka, podnebnih sprememb in drugih stresnih dejavnosti (Vilhar et al.,

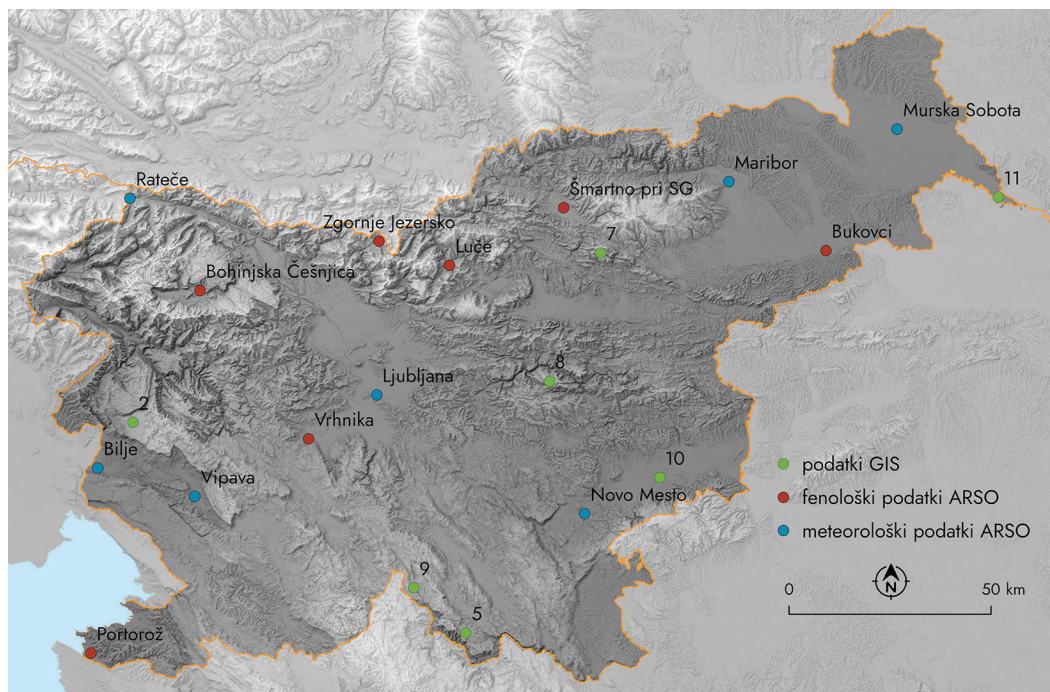
2013b). V analizo smo vzeli sedem ploskev, ki so zajemale tri drevesne vrste: bukev (*Fagus sylvatica*), dob (*Quercus robur*) in beli gaber (*Carpinus betulus*), za obdobje 2004–2011. Glede na mednarodno usklajeno metodologijo ICP Forests (Raspe et al., 2020; Vilhar et al., 2013a; Vilhar et al., 2013b) pomeni začetek fenološke rastle sezone gozdov večinsko odpiranje prvih listov na drevesu v pomladi, konec pa večinsko obarvanje listov v jeseni. Vsaka fenološka faza (olistanje, obarvanje in odpadanje listov) se ocenjuje po petstopenjski lestvici (< 1 %, 1–33 %, 34–66 %, 67–99 %, > 99 %).

- meteorološki podatki ARSO

Vir: Arhiv meteoroloških podatkov, ARSO.

Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO) meteorološki začetek rastle sezone definira na podlagi preseka petih stopinj Celzija spomladi in jeseni. To pomeni, da je spomladi za začetek sezone potrebnih vsaj šest zaporednih dni s povprečno temperaturo, višjo od 5° C, konec rastle sezone jeseni pa zaznamuje šest zaporednih dni, ko je izmerjena povprečna temperatura nižja od 5° C. Podatke, zbrane v obdobju 2003–2014, smo dodali, da bi preverili, ali obstaja povezava med satelitskim signalom in meteorološko opredelitvijo rastle sezone, čeprav ta ni neposredno povezana s fenološkimi opazovanji.

Naše študijsko območje pokriva 21 točk po Sloveniji (slika 1).



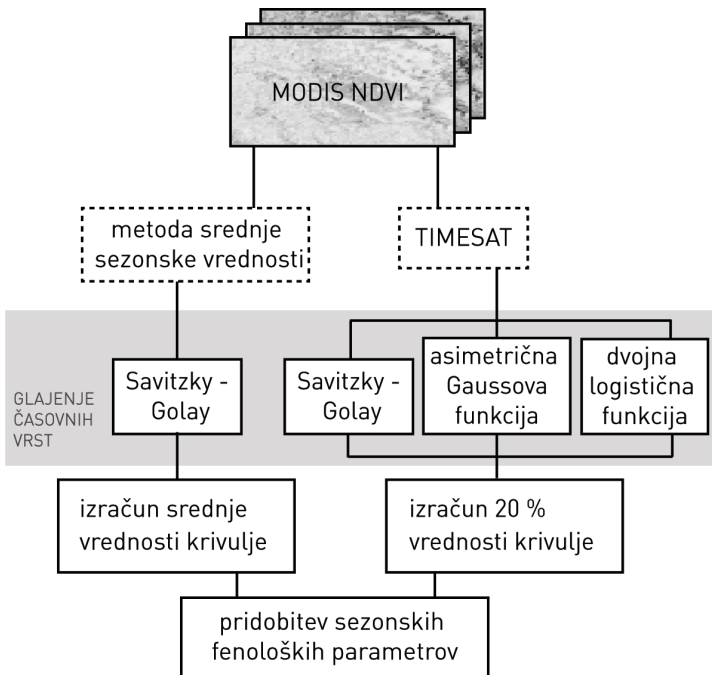
Slika 1: Lokacije, kjer smo preverjali uporabnost satelitskih posnetkov MODIS (angl. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) za določevanje fenoloških faz iz podatkov GIS Gozdarskega inštituta Slovenije in agencije ARSO.

Pred samo analizo moramo upoštevati, da večina drevesnih vrst, vključenih v študijo, ne tvori čistih

sestojev na opazovanih površinah, torej ne opazujemo fenoloških faz posameznih drevesnih vrst, temveč povprečje fenoloških faz na posameznem opazovanem območju. Izjemi sta GIS-ploskvi 2 in 8, ki zajemata čiste bukove sestoje (tudi na ploskvi 5 prevladuje bukev), ter ploskvi 10 in 11, kjer v zgornjem sloju prevladuje hrast dob.

2.2 Izračun fenoloških faz iz podatkov MODIS

Iz časovnih vrst NDVI smo za izbrane točke izračunali začetek, konec in dolžino rastne sezone. Izbira metode določevanja fenoloških faz temelji na uporabljenem vegetacijskem indeksu, izbranem fenološkem pragu (kaj je tisto, kar opredeljuje začetek/konec sezone) in metodi pretvorbe praga v vrednost vegetacijskega indeksa ali v vrednost za preučevanje vrste vegetacije (Eklundh in Jönsson, 2017). Za natančno določitev rastne sezone in njenih značilnosti s podatki MODIS za vsako posamezno leto smo razvili lasten pristop v programskem jeziku R (R Core Team, 2022) in za primerjavo rezultatov uporabili orodje TIMESAT (Jönsson in Eklundh, 2004). Potek analize v tej študiji prikazuje slika 2.

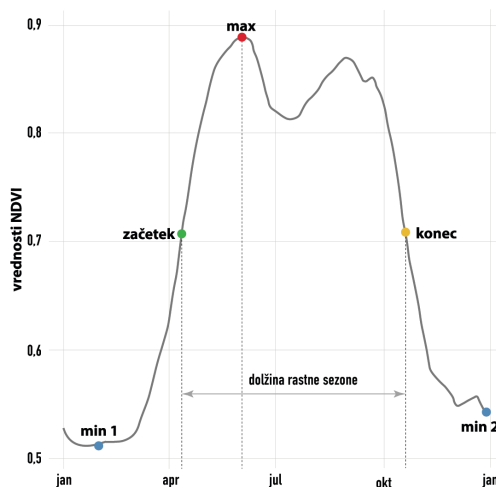


Slika 2: Grobi diagram poteka obdelave satelitskih posnetkov za določevanje fenoloških faz.

Metoda srednje sezone vrednosti

Pristop za določevanje ključnih fenoloških faz, ki smo ga razvili v programskem okolju R za potrebe te naloge, je razmeroma preprost in deluje na podlagi določevanja praga krivulje vrednosti NDVI. Za odstranitev šuma smo časovno vrsto MODIS NDVI zgladili s prilagodljivim filtrom Savitzky-Golay (Savitzky in Golay, 1964), ki je posebej primeren za izravnavo časovnih vrst NDVI, saj je z njim mogoče odstraniti prekomerno visoke in nizke vrednosti (Chen et al., 2004). Uporabili smo dva parametra

glajenja: polinomsko stopnjo filtra $p = 5$ in velikost premikajočega se filtra $n = 11$ (polinomsko stopnja p mora biti manjša od velikosti okna n , ki mora biti liho pozitivno število), kar se je empirično izkazalo za najboljšo kombinacijo. Glajenju sledi izračun vrhov (viškov) in dolin (nižkov) na časovnem histogramu vrednosti NDVI. Datum fenološke razvojne faze je tako izračunan na podlagi določevanja mejnih vrednosti ali pragov za opredelitev začetka ali konca rastne sezone. Začetek rastne sezone se običajno nanaša na datum, ko se vrednosti NDVI znatno povečajo, konec pa označuje datum izrazitega zmanjšanja vrednosti fotosintetske aktivnosti rastlin. Za njuno določevanje smo uporabili prag 50 % amplitude obravnavanega vegetacijskega indeksa v sezoni (slika 3), kar je pogosta praksa v ostalih analizah (glej na primer Noumonvi et al., 2021, ali Restrepo-Coupe et al., 2015). To pomeni, da je začetek (konec) rastne sezone določen kot mediana, oziroma sredina med najmanjšo in največjo vrednostjo na krivulji v naraščajočem (padajočem) histogramu vrednosti NDVI v posameznem letu. Izbira mediane na krivulji je pragmatična odločitev, saj lahko najbolje izbrani prag določevanja začetka ali konca rastne sezone razlikuje glede na lokacijo proučevanja in vrsto drevesne vrste (Noumonvi et al., 2021) ali vrsto kmetijskih rastlin (Huang et al., 2019).



Slika 3: Fenološke (sezonske) faze, izračunane z metodo srednje sezonske vrednosti na podlagi vrednosti časovne vrste NDVI.

Metodo srednje vrednosti lahko dinamično uporabimo za vsako leto, vendar je zelo občutljiva za vplive snega, oblakov, suše in podobne ekstremne vrednosti, kar lahko povzroči velike razlike v rezultatih. Ti se zapišejo v tabelarno obliko kot dan v letu (angl. *DOY – day of the year*) za vsako leto posebej.

2.3 TIMESAT, verzija 3.3

Čeprav obstaja obilica programskih paketov za določevanje fenoloških faz (npr. PhenoSat, QPhenoMetrics, DATimeS, Phenex, Greenbrown), smo se v tej študiji osredotočili na uporabo orodja TIMESAT (Jönsson in Eklundh, 2004). Je računsko preprosto, a robustno orodje, ki je pogosto uporabljeno v študijah fenologije rastja na podlagi časovnih vrst satelitskih posnetkov (npr. Cho et al., 2017; Davis et al., 2017; Leeuwen, 2008; O'Connor et al., 2012; Wessels et al., 2011). Rezultate pridobimo na podlagi različnih pristopov glajenja podatkov, ki vplivajo na definiranje fenoloških faz (metode Savitzky-Golay,

asimetrična Gaussova funkcija, dvojna logistična funkcija, lokalna obtežena regresija). Končna izbira metode je odvisna od lastnosti vhodnih podatkov in jo določimo na podlagi pregleda ujemanja glajenih in prvotnih podatkov. Začetek rastne sezone je v TIMESAT določen kot povečanje vrednosti na krivulji za 20 % sezonske amplitude in obratno, konec rastne sezone je opredeljen kot zmanjšanje vrednosti za 80 % amplitude.

2.4 Statistične analize

Linearno povezanost dveh številskih spremenljivk (DOY) fenoloških faz, pridobljenih s satelitskimi posnetki in vsemi tremi tipi terenskih podatkov, smo testirali s Pearsonovim koeficientom korelacije. Za oceno povezanosti med fenološkimi fazami iz podatkov MODIS in fenološkimi podatki ARSO smo uporabili časovni niz 2000–2018, za fenološke podatke GIS obdobje 2004–2011 in za meteorološke podatke 2003–2014.

S Pearsonovim koeficientom korelacije smo preverili tudi povezanost različnih metod izračuna začetka in konca rastne sezone (metoda srednje sezonske vrednosti in TIMESAT Savitzky-Golay, Gauss in dvojna log. funkcija) s satelitskimi podatki MODIS NDVI, s fenološkimi podatki GIS in meteorološkimi podatki ARSO. Za analizo smo uporabljali podatke v letih 2004–2011 (obdobje osmih let), saj je to časovni presek, ko sta dostopna oba niza terenskih oziroma referenčnih podatkov, prav tako imamo za to obdobje dosegljive podatke MODIS.

Vse statistične analize in grafi so bili narejeni v programskem jeziku R (R Core Team, 2022).

3 REZULTATI

3.1 Primerjava fenoloških faz, zbranih na terenu, s satelitsko pridobljenimi fenološkimi fazami

Pričakovano je, da se zaradi vzorcev padavin in atmosferske cirkulacije začetek in konec rastne sezone spreminjata iz leta v leto za nekaj dni (Broich et al., 2014). V preglednici 1 so podane povprečne pridobljene vrednosti dneva v letu (DOY) za vsa leta za: 1. začetek rastne sezone (ZRS), 2. konec rastne sezone (KRS) in 3. dolžino rastne sezone (DRS) za vse točke, izračunane iz satelitskih posnetkov z metodo srednje vrednosti (MSV) v primerjavi s terenskimi podatki (fenološki (ARSO, GIS) in meteorološki).

Za fenološke (ARSO in GIS) terenske podatke je pri vseh točkah začetek rastne sezone zaznan nekje med majem in junijem, konec rastne sezone pa je v septembru in oktobru. Meteorološki podatki začetek sezone opredelijo prej, že v marcu in aprilu, konec sezone pa kasneje, v oktobru in novembru, zaradi česar je meteorološka sezona bistveno daljša.

Iz preglednice 1 je razvidno, da se določevanje fenoloških faz iz satelitskih posnetkov najbolj prilega fenološkim podatkom mreže GIS, kjer je v nekaterih primerih odstopanje minimalno (točke 8, 10 in 11: razlika med začetkom rastne sezone je le en dan), absolutne razlike pri podatkih GIS so tudi najmanjše v primerjavi z vsemi testiranimi terenskimi podatki (za ZRS v povprečju 8 dni, za KRS 15 dni, za DRS pa 10 dni). Nasprotno je primerjava satelitskih in meteoroloških fenoloških podatkov generalno kazala največje razlike med rezultati. Na nekaterih izmerjenih postajah so opazne večje absolutne napake,

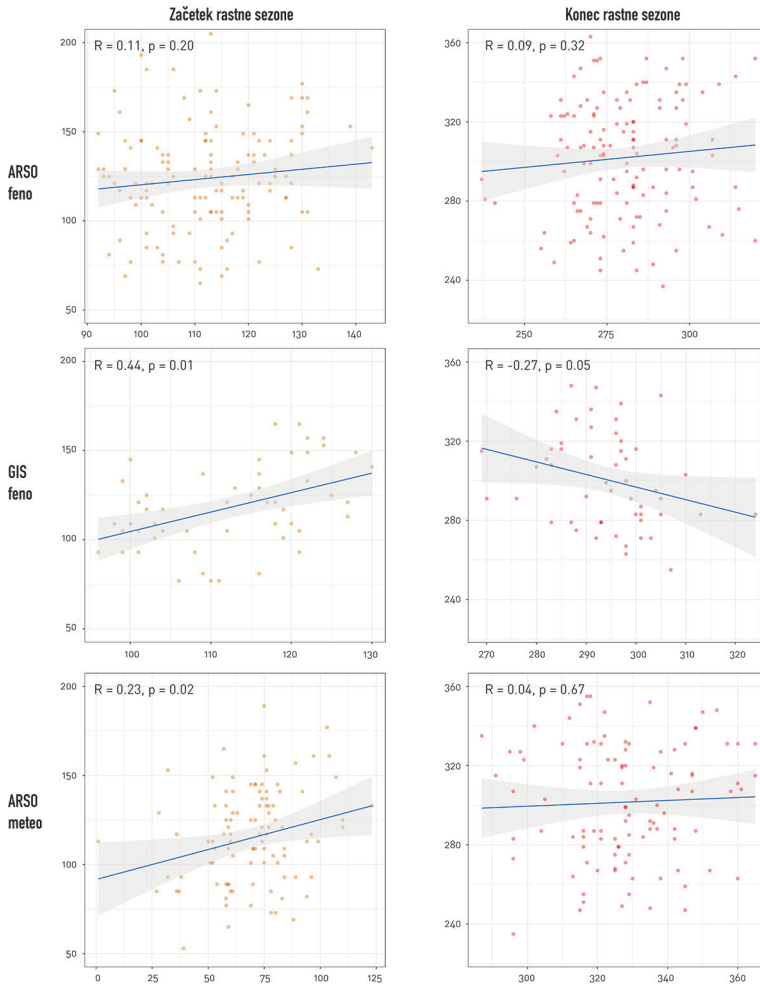
največje razlike so dosegle tudi razliko 75 dni v začetku rastne sezone (postaja Bilje), še največje razlike pa se kažejo v dolžini rastne sezone (absolutna razlika med obema meritvama je v povprečju okoli 70 dni). Fenološki podatki ARSO so v primerjavi s podatki GIS in meteorološkimi opazovanji neke vmes in dosegajo razliko z meritvami MODIS pri ZRS v povprečju za 15 dni in za KRS 23 dni. Za dolžino rastne sezone se podatka v povprečju razlikujeta za 16 dni.

Preglednica 1: Začetki in konci rastnih sezon (podatek je enak dnevu v letu, DOY) ter dolžine rastnih sezon (skupno število dni) glede na fenološke ($_f$ ARSO, $_f$ GIS) in meteorološke ($_m$ ARSO) terenske podatke, v primerjavi s podatki, pridobljenimi iz satelitskih posnetkov MODIS, določeni z metodo srednje vrednosti (MSV). V oklepaju so izračunane razlike dni med primerjanima naboroma podatkov (Δ).

$_f$ ARSO	ZRS	ZRS_MS Δ	KRS	KRS_MS Δ	DRS	DRS_MS Δ
Bukovci	111	138 (27)	269	307 (38)	158	169 (11)
Portorož	100	117 (17)	303	297 (-6)	203	180 (-23)
Boh. Česnjica	119	123 (4)	277	303 (26)	157	180 (23)
Vrhnika	109	101 (-8)	273	276 (-3)	164	174 (10)
Luče	110	127 (17)	274	305 (31)	163	178 (15)
Šmartno pri SG	110	137 (27)	289	318 (29)	179	180 (1)
Zg. Jezerško	126	120 (-6)	272	299 (27)	146	179 (33)
$_f$ GIS	ZRS	ZRS_MS Δ	KRS	KRS_MS Δ	DRS	DRS_MS Δ
Točka 2	112	116 (4)	302	299 (-3)	190	183 (-7)
Točka 5	113	127 (14)	290	307 (17)	176	180 (4)
Točka 7	115	124 (9)	293	302 (9)	178	178 (0)
Točka 8	120	119 (-1)	283	297 (14)	163	178 (15)
Točka 9	115	133 (18)	286	317 (31)	171	184 (13)
Točka 10	101	100 (-1)	297	284 (-13)	196	184 (-12)
Točka 11	102	103 (1)	309	288 (-21)	207	185 (-22)
$_m$ ARSO	ZRS	ZRS_MS Δ	KRS	KRS_MS Δ	DRS	DRS_MS Δ
Ljubljana	68	98 (30)	330	278 (-52)	262	180 (-82)
Bilje	54	129 (75)	339	311 (-28)	285	182 (-103)
Novo mesto	69	110 (41)	322	293 (-29)	253	183 (-70)
M. Sobota	73	109 (36)	325	299 (-26)	252	190 (-62)
Rateče	99	140 (41)	307	322 (15)	208	182 (-26)
Vipava	57	112 (55)	344	312 (-32)	287	200 (-87)
Maribor	70	109 (39)	325	295 (-30)	254	186 (-68)

Linearna povezanost med spremenljivkami za začetek in konec rastne sezone je prikazana na sliki 4. Prav tako je na sliki 4 za vsa obravnavana leta prikazan razsevni grafikon za začetek in konec rastne sezone za vse piksele. Vzorci, na osnovi katerih so izračunane korelacije med fenološkimi fazami, določenimi na podlagi podatkov MODIS NDVI in fenoloških podatkov GIS, so bile statistično značilne za začetek ($p = 0,01$) in konec ($p = 0,05$) rastne sezone. Pri testiranju povezanosti v začetku rastne sezone je bila korelacija pozitivna ($R = 0,44$), medtem ko je bila povezanost na koncu rastne sezone negativna ($R = -0,27$). Statistično značilna je bila tudi korelacija med podatki MODIS NDVI in začetku rastne sezone, določenimi na podlagi meteoroloških podatkov ARSO ($R = 0,23$; $p = 0,02$). Med fenološkimi podatki MODIS NDVI in fenološkimi podatki ARSO ni bilo statistično značilne povezanosti ($p > 0,05$). Vred-

nost intervala zaupanja, ki je v grafikonih prikazan v sivi barvi, je 95 %.



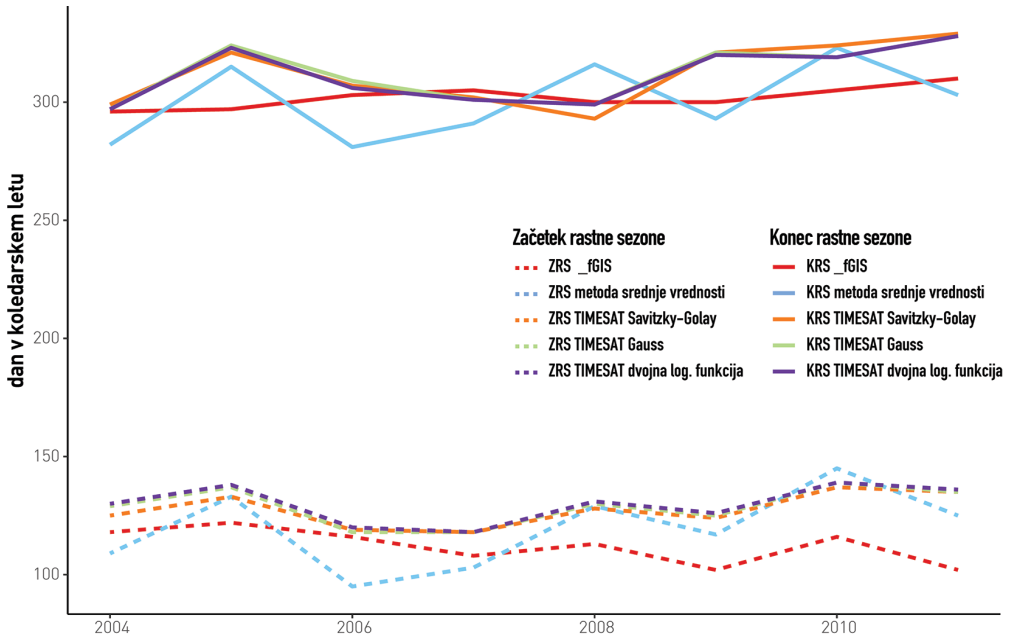
Slika 4: Razsevni grafikon in korelacija med fenološkimi podatki ARSO in GIS ter meteorološkimi podatki v primerjavi z metodo srednje vrednosti, aplicirano na časovne vrste MODIS NDVI podatkov.

3.2 Primerjava različnih pristopov za določevanje fenoloških faz

Primerjali smo tudi fenološke faze, pridobljene z metodo srednje vrednosti in tremi različnimi pristopi orodja TIMESAT, ter se osredotočili na njihove razlike v primerjavi s terenskimi podatki. S tem smo želeli testirati več metod za določitev datuma fenološke razvojne faze iz MODIS NDVI podatkov. Krivulje na sliki 5 prikazujejo odstopanja vrednosti med začetkom in koncem rastne sezone in izbranimi pristopi.

Med rezultati različnih metod je zaznati določeno stopnjo odstopanj. Začetek rastne sezone je v povprečju opažen med 100. in 140. dnevom (april–maj), medtem ko je konec rastne sezone opažen nekje med 290. in 325. dnevom (oktober–november). Na podlagi grafa lahko opazimo, da se začetek in konec rastne

sezone iz satelitskih posnetkov z različnimi pristopi večinoma zaznata kasneje (za približno 15 %), kot sta bila zabeležena na terenu. Ta odstopanja so posledica glajenja satelitskih podatkov (Savitzky-Golay) in pogostosti opazovanj (16-dnevni kompozit).



Slika 5: Primerjava začetka (črtkane linije) in konca (polne linije) rastnih sezon na izbrani gozdarski točki (vrednosti ZRS_fGIS, KRS_fGIS) v primerjavi s pristopom srednje vrednosti ter rezultati različnih glajenj s programskim okoljem TIMESAT.

Preverili smo tudi povezavo med različnimi metodami določevanja fenoloških faz s satelitskimi posnetki ter terenskimi fenološkimi podatki GIS in meteorološkimi podatki ARSO (preglednica 2). Zaradi odsotnosti korelacije med satelitskimi podatki in fenološkimi podatki ARSO slednjih nismo vključili v analizo.

Preglednica 2: Povezanost različnih metod izračuna začetka in konca rastne sezone s satelitskimi podatki MODIS NDVI, s fenološkimi podatki GIS in meteorološkimi podatki ARSO. Statistično značilne korelacije so poudarjene.

		Začetek rastne sezone		Konec rastne sezone	
Uporabljena metoda izračuna		p-vrednost	Korelacijski koeficient (R)	p-vrednost	Korelacijski koeficient (R)
_fGIS	Metoda srednje sezonske vrednosti	0,01	0,44	0,05	-0,27
	TIMESAT Savitzky-Golay	0,55	-0,09	0,001	-0,54
	TIMESAT Gauss	0,05	0,28	0,38	-0,12
	TIMESAT dvojna log. funkcija	0,02	0,35	0,30	0,16
_mARSO	Metoda srednje sezonske vrednosti	0,02	0,23	0,67	0,04
	TIMESAT Savitzky-Golay	0,10	0,16	0,56	0,06
	TIMESAT Gauss	0,06	0,19	0,21	0,13
	TIMESAT dvojna log. funkcija	0,05	0,19	0,18	0,13

Testiranje linearne povezanosti med različnimi metodami izračuna začetka in konca rastne sezone, določenimi s satelitskimi podatki MODIS NDVI, v primerjavi s fenološkimi podatki GIS in meteorološkimi podatki ARSO, kažejo, da je koeficient korelacije za ZRS najvišji pri povezavi med metodo srednje sezone vrednosti in fenološkimi podatki GIS ($R = 0,44$, $p = 0,01$). Vendar pa obstajajo statistično značilne povezave tudi za metodi TIMESAT, in sicer Gauss in dvojna log. funkcija (preglednica 3).

Statistično značilna je bila tudi korelacija med ZRS, pridobljenim na podlagi podatkov MODIS NDVI po metodi srednje sezone vrednosti in TIMESAT dvojne log. funkcije, ter meteorološko določenim ZRS.

Podobno kot pri ZRS je bila tudi pri določanju KRS korelacija med MODIS NDVI podatki in terenskimi fenološkimi podatki GIS statistično značilna ($p = 0,05$), ko smo dan v letu za KRS določili iz MODIS NDVI podatkov po metodi srednje sezone vrednosti. Se je pa v tem primeru korelacija izboljšala, če smo uporabili metodo TIMESAT Savitzky-Golay ($R = -0,54$, $p = 0,001$).

4 RAZPRAVA

Določevanje fenoloških faz iz satelitskih posnetkov v primerjavi s terenskim pridobivanjem podatkov je pomembno predvsem v tem, da določevanje faz ni vezano na določen tip rastlinske vrste in da jih lahko računamo na velikem območju naenkrat. Nekateri avtorji (npr. Situch et al., 2022) navajajo, da imajo satelitski posnetki pri zagotavljanju informacij o vegetaciji prednost pred podatki, zbranimi na terenu. Pri tem je nujno izpostaviti, da je velika težava izračunanih fenoloških faz iz satelitskih posnetkov v tem, da niso enoznačno primerljivi s terenskimi podatki. Začetek rastne sezone je lahko nekje zabeležen kot setev, kar pomeni, da za realen podatek temu dnevu dodamo 14 dni oziroma kolikor je pač treba, da rastlina vidno ozeleni. Prav tako se terenska opazovanja med seboj razlikujejo in je začetek rastne sezone definiran drugače pri fenoloških opazovanjih (GIS, ARSO) (Vilhar et al., 2018) ali meteoroloških opazovanjih (ARSO). Iz opisanih primerov lahko razberemo, da obstaja velika variabilnost že znotraj same definicije fenoloških faz. Pri modeliranju fenologije je treba biti pozoren, da območje piksla, ki ga opazujemo, opisuje fenologijo mešanih rastlin na obravnavanem območju in ne nujno točno določene rastlinske vrste, razen če ta ne zavzema celotnega območja piksla. Prav tako se pri modeliranju pogosto ne upoštevajo nadmorska višina, ekspozicija in naklon, ki vsi vplivajo na fenološke lastnosti rastja.

Pridobljeni rezultati sovpadajo z ugotovitvami raziskovalcev White et al. (2009) in Misra et al. (2016), ki pravijo, da izračunane fenološke faze lahko kažejo velika odstopanja med različnimi metodami analiz satelitskih posnetkov. To pomeni, da je za pridobitev smiselnih rezultatov ključnega pomena izbira glajenja in metode določanja fenoloških faz na podlagi daljinskega zaznavanja (Siluck et al., 2022).

Iz rezultatov naše študije, ki se odražajo v prostorsko-časovnem vzorcu NDVI, ugotovimo, da fenološke faze, pridobljene s satelitskimi posnetki, statistično značilno korelirajo s fenološkimi podatki GIS. Ti terenski podatki na vsaki točki vključujejo fenološka opazovanja več dreves iste drevesne vrste in so glede okoliškega tipa rabe tal najbolj primerljivi za raven satelitskih opazovanj v srednji in nizki ločljivosti. S tovrstnimi satelitskimi posnetki namreč ne zaznavamo le posameznega, na terenu opazovanega drevesa, temveč njegovo (širšo) okolico, in se zato meri nekakšna povprečna fenologija vseh dreves, prisotnih v obravnavanem območju piksla.

Fenološki podatki ARSO so za satelitska opazovanja nizkih ali srednjih ločljivosti manj primerni, saj v našem primeru obravnavajo posamezna drevesa lipe, ki v izbranem pikslu niso reprezentativna oziroma so

celo v izraziti manjšini. Prav tako je treba upoštevati, da je lokacija teh terenskih podatkov nenatančna, saj lahko od zabeleženih koordinat odstopa tudi en kilometer ali več. Takšna odstopanja lahko privedejo do odčitavanja napačnih vrednosti NDVI in posledično nepravilnih ocen fenoloških faz za neko območje.

Pri uporabi meteoroloških podatkov ARSO je očitno, da ne prikazujejo na terenu zaznanih fenoloških podatkov, merilna mesta so postavljena na lokacijah, kjer je prekritost piksla z vegetacijo manjša (v mestih), in posledično rezultati NDVI zaradi vplivov drugih tipov vrst rabe tal ne morejo odražati stanja vegetacije na teh območjih. Vseeno pa smo v študiji izhajali iz predpostavke, da je vegetacijski razvoj (predvsem listavcev) povezan s temperaturami v okolju oziroma da meteorološki podatki odločilno vplivajo na fenološke pojave (Vilhar et al., 2014). Ugotovili smo, da meteorološki podatki v primerjavi s fenološkimi podatki, pridobljenimi iz časovnih vrst podatkov MODIS, preveč precenijo dolžino rastne sezone.

Glede uporabljenih podatkov MODIS nizke prostorske ločljivosti 250 m se zavedamo, da modeli ne morejo natančno opisati fenologije določene vrste vegetacije, saj rastje na posnetku najpogosteje ni homogeno, kar bi bilo zaželeno za boljše proučevanje variabilnosti fenoloških značilnosti vegetacije na obravnavanih območjih. To so ugotovili tudi Younes et al. (2021), ki pa navkljub premajhni ločljivosti posnetkov MODIS dokazujejo, da podatki MODIS vendarle zagotavljajo koristne namige glede fenologije obravnavanega območja. Za smiselno zaznavo fenoloških faz s podatki MODIS bi torej morali opazovati monokulture velikosti vsaj 6,25 hektarja z uporabo satelitskih posnetkov višjih prostorskih ločljivosti. Pri nadaljnjih raziskavah se osredotočamo na uporabo satelitov Landsat in Sentinel-2, ki poleg boljše ločljivosti zaradi pogostejših opazovanj omogočajo tudi natančnejše ujemanje faz časovnih vrst s podatki, izmerjenimi na terenu (Fisher et al., 2006; Jönsson et al., 2018; Melaas et al., 2013). Prav tako se za izboljšane rezultate osredotočamo na izračun deležev posameznih drevesnih vrst za vsak obravnavan piksel satelitskega posnetka.

Navkljub nekaterim opisanim težavam pri računanju fenoloških faz iz satelitskih podatkov MODIS zagotavlja primerjava med satelitsko zaznanimi vegetacijskimi indeksi in vrednostmi vegetacijske produktivnosti, ob primerni analizi podatkov, dragocen vpogled v uporabnost satelitskih podatkov za pomoč pri potrjevanju, izpopolnjevanju in splošnem izboljšanju simulacije rasti vegetacije.

Zahvala

Prispevek je nastal s finančno podporo Javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije v okviru raziskovalnega projekta J2-3055 ROVI – Združevanje in obdelava radarskih in optičnih časovnih vrst satelitskih posnetkov za spremljanje naravnega okolja ter programov št. P2-0406 Opazovanje Zemlje in geoinformatika, P6-0079 Antropološke in prostorske študije in P4-0107 Gozdna biologija, ekologija in tehnologija. Avtorji se zahvaljujemo agenciji ARSO za poslane fenološke in meteorološke podatke. Zbiranje in obdelava fenoloških podatkov GIS je delno potekala v okviru projektov eLTER (eLTER PPP in eLTER PLUS) ter RI-SI-LifeWatch, ki jih financirata RS in EU iz Evropskega sklada za regionalni razvoj.

Prav tako se iskreno zahvaljujemo dvema anonimnima recenzentoma, ki sta ključno pripomogla k izboljšavi članka.

Literatura in viri:

- Baumann, M., Ozdogan, M., Richardson, A. D., Radeloff, V. C. (2017). Phenology from Landsat when data is scarce: Using MODIS and Dynamic Time-Warping to combine multi-year Landsat imagery to derive annual phenology curves. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 54, 72–83. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.09.005>
- Bolton, D. K., Gray, J. M., Melaas, E. K., Moon, M., Eklundh, L., Friedl, M. A. (2020). Continental-scale land surface phenology from harmonized Landsat 8 and Sentinel-2 imagery. *Remote Sensing of Environment*, 240, 111685. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111685>
- Broich, M., Huete, A., Tulbure, M. G., Ma, X., Xin, Q., Paget, M., Restrepo-Coupe, N., Davies, K., Devadas, R., Held, A. (2014). Land surface phenological response to decadal climate variability across Australia using satellite remote sensing. *Biogeosciences*, 11, 5181–5198. DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-11-5181-2014>
- Cai, Z., Jönsson, P., Jin, H., Eklundh, L. (2017). Performance of Smoothing Methods for Reconstructing NDVI Time-Series and Estimating Vegetation Phenology from MODIS Data. *Remote Sensing*, 9, 1271. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs9121271>
- Chen, J., Jönsson, P., Tamura, M., Gu, Z., Matsushita, B., Eklundh, L. (2004). A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky–Golay filter. *Remote Sensing of Environment*, 91, 332–344. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.03.014>
- Cho, M. A., Ramoelo, A., Dziba, L. (2017). Response of Land Surface Phenology to Variation in Tree Cover during Green-Up and Senescence Periods in the Semi-Arid Savanna of Southern Africa. *Remote Sensing*, 9, 689. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs9070689>
- Davis, C., Hoffman, M., Roberts, W. (2017). Long-term trends in vegetation phenology and productivity over Namaqualand using the GIMMS AVHRR NDVI3g data from 1982 to 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.SAJB.2017.03.007>
- Eklundh, L., Jönsson, P. (2017). TIMESAT 3.3 with seasonal trend decomposition and parallel processing – Software Manual.
- Fisher, J. I., Mustard, J. F., Vadeboncoeur, M. A. (2006). Green leaf phenology at Landsat resolution: Scaling from the field to the satellite. *Remote Sensing of Environment*, 100, 265–279. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.10.022>
- Garonna, I., de Jong, R., Schaepman, M. E. (2016). Variability and evolution of global land surface phenology over the past three decades (1982–2012). *Global Change Biology*, 22, 1456–1468. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.13168>
- Gonsamo, A., Chen, J. M., Price, D. T., Kurz, W. A., Wu, C. (2012). Land surface phenology from optical satellite measurement and CO₂ eddy covariance technique. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 117. DOI: <https://doi.org/10.1029/2012JG002070>
- Heumann, B. W., Seaquist, J. W., Eklundh, L., Jönsson, P. (2007). AVHRR derived phenological change in the Sahel and Soudan, Africa, 1982–2005. *Remote Sensing of Environment*, 108, 385–392. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.11.025>
- Huang, X., Liu, J., Zhu, W., Atzberger, C., Liu, Q. (2019). The Optimal Threshold and Vegetation Index Time Series for Retrieving Crop Phenology Based on a Modified Dynamic Threshold Method. *Remote Sensing*, 11, 2725. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11232725>
- Jönsson, P., Cai, Z., Melaas, E., Friedl, M. A., Eklundh, L. (2018). A Method for Robust Estimation of Vegetation Seasonality from Landsat and Sentinel-2 Time Series Data. *Remote Sensing*, 10, 635. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs10040635>
- Jönsson, P., Eklundh, L. (2004). TIMESAT – a program for analyzing time-series of satellite sensor data. *Computers & Geosciences*, 30, 833–845. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2004.05.006>
- Kowalski, K., Senf, C., Hostert, P., Pflugmacher, D. (2020). Characterizing spring phenology of temperate broadleaf forests using Landsat and Sentinel-2 time series. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 92, 102172. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102172>
- Leeuwen, W. J. D. (2008). Monitoring the Effects of Forest Restoration Treatments on Post-Fire Vegetation Recovery with MODIS Multitemporal Data. *Sensors*, 8, 2017–2042. DOI: <https://doi.org/10.3390/s8032017>
- Melaas, E. K., Friedl, M. A., Zhu, Z. (2013). Detecting interannual variation in deciduous broadleaf forest phenology using Landsat TM/ETM+ data. *Remote Sensing of Environment*, 132, 176–185. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.01.011>
- Melaas, E. K., Sulla-Menashe, D., Friedl, M. A. (2018). Multidecadal Changes and Interannual Variation in Springtime Phenology of North American Temperate and Boreal Deciduous Forests. *Geophysical Research Letters*, 45, 2679–2687. DOI: <https://doi.org/10.1002/2017GL076933>
- Misra, G., Buras, A., Menzel, A. (2016). Effects of Different Methods on the Comparison between Land Surface and Ground Phenology – A Methodological Case Study from South-Western Germany. *Remote Sensing*, 8, 753. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs8090753>
- Noumonvi, K. D., Oblişar, G., Žust, A., Vilhar, U. (2021). Empirical Approach for Modelling Tree Phenology in Mixed Forests Using Remote Sensing. *Remote Sensing*, 13 (15), 3015. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13153015>
- O'Connor, B., Dwyer, E., Cawkwell, F., Eklundh, L. (2012). Spatio-temporal patterns in vegetation start of season across the island of Ireland using the MERIS Global Vegetation Index. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 68, 79–94. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.01.004>
- Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J.-M., Tucker, C. J., Stenseth, N. C. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*, 20, 503–510. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.05.011>
- R Core Team (2022=). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- Raspe, S., Fleck, S., Beuker, E., Bastrup-Birk, A., Preuhsler, T. (2020). Part VI: Phenological Observations. Version 2020-03. V Thünen Institute of Forest Ecosystems (ur.), Manual on Methods and Criteria for Harmonized Sampling, Assessment, Monitoring and Analysis of the Effects of Air Pollution on Forests, UNECE/ICP Forests Programme Co-Ordinating Centre. Eberswalde, Germany, p. 14.
- Restrepo-Coupe, N., Huete, A., Davies, K. (2015). Satellite Phenology Validation. V A. Held (ur.), S. Phinn (ur.), M. Soto-Berelev (ur.), S. Jones (ur.), AusCover Good Practice Guidelines: A Technical Handbook Supporting Calibration and Validation Activities of Remotely Sensed Data Products. TERN AusCover, 155–177.

- Savitzky, A., Golay, M. J. E. (1964). Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. *Anal. Chem.*, 36, 1627–1639. DOI: <https://doi.org/10.1021/ac60214a047>
- Siłuch, M., Bartmiński, P., Zgłobicki, W. (2022). Remote Sensing in Studies of the Growing Season: A Bibliometric Analysis. *Remote Sensing*, 14, 1331. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14061331>
- Sjöström, M., Ardö, J., Arneith, A., Boulain, N., Cappelaere, B., Eklundh, L., de Grandcourt, A., Kutsch, W. L., Merbold, L., Nouvellon, Y., Scholes, R. J., Schubert, P., Seaquist, J., Veenendaal, E. M. (2011). Exploring the potential of MODIS EVI for modelling gross primary production across African ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 115, 1081–1089. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.12.013>
- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8, 127–150. DOI: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)
- Vilhar, U., Beuker, E., Mizunuma, T., Skudnik, M., Lebourgeois, F., Soudani, K., Wilkinson, M. (2013a). Tree Phenology, V M. Ferretti, R. Fischer (ur.), *Forest Monitoring. Methods for Terrestrial Investigations in Europe with an Overview of North America and Asia*. Elsevier, 169–182. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-098222-9.00009-1>.
- Vilhar, U., De Groot, M., Zust, A., Skudnik, M., Simončič, P. (2018). Predicting phenology of European beech in forest habitats. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 11, 41. <https://doi.org/10.3832/ifor1820-010>.
- Vilhar, U., Skudnik, M., Ferlan, M., Simončič, P. (2014). Influence of meteorological conditions and crown defoliation on tree phenology in intensive forest monitoring plots in Slovenia. *V Acta Silvae et Ligni*. Presented at the *Acta Silvae et Ligni*, 1–15. <https://doi.org/10.20315/ASetL.105.1>
- Vilhar, U., Skudnik, M., Simončič, P. (2013b). Fenološke faze dreves na ploskvah intenzivnega monitoringa gozdnih ekosistemov v Sloveniji. *V Acta Silvae et Ligni*. Presented at the *Acta Silvae et Ligni*, 5–17. <https://doi.org/10.20315/ASetL.100.1>
- Vrieling, A., Meroni, M., Darvishzadeh, R., Skidmore, A. K., Wang, T., Zurita-Milla, R., Oosterbeek, K., O'Connor, B., Paganini, M. (2018). Vegetation phenology from Sentinel-2 and field cameras for a Dutch barrier island. *Remote Sensing of Environment*, 215, 517–529. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.03.014>
- Wessels, K., Steenkamp, K., von Maltitz, G., Archibald, S. (2011). Remotely sensed vegetation phenology for describing and predicting the biomes of South Africa. *Applied Vegetation Science*, 14, 49–66. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1654-109X.2010.01100.x>
- White, M. A., De Beurs, K. M., Didan, K., Inouye, D. W., Richardson, A. D., Jensen, O. P., O'keefe, J., Zhang, G., Nemani, R. R., Van Leeuwen, W. J. D., Brown, J. F., De Wit, A., Schaepman, M., Lin, X., Dettinger, M., Bailey, A. S., Kimball, J., Schwartz, M. D., Baldocchi, D. D., Lee, J. T., Lauenroth, W. K. (2009). Intercomparison, interpretation, and assessment of spring phenology in North America estimated from remote sensing for 1982–2006. *Global Change Biology*, 15, 2335–2359. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01910.x>
- Younes, N., Joyce, K. E., Maier, S. W. (2021). All models of satellite-derived phenology are wrong, but some are useful: A case study from northern Australia. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 97, 102285. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102285>
- Zhang, X., Friedl, M. A., Schaaf, C. B., Strahler, A. H., Hodges, J. C. F., Gao, F., Reed, B. C., Huete, A. (2003). Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 84, 471–475. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00135-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00135-9)
- Zhu, Z., Piao, S., Myneni, R. B., Huang, M., Zeng, Z., Canadell, J. G., Ciais, P., Sitch, S., Friedlingstein, P., Arneith, A., Cao, C., Cheng, L., Kato, E., Koven, C., Li, Y., Lian, X., Liu, Y., Liu, R., Mao, J., Pan, Y., Peng, S., Peñuelas, J., Poulter, B., Pugh, T. A. M., Stocker, B. D., Viogy, N., Wang, X., Wang, Y., Xiao, Z., Yang, H., Zaehle, S., Zeng, N. (2016). Greening of the Earth and its drivers. *Nature Clim Change*, 6, 791–795. DOI: <https://doi.org/10.1038/nclimate3004>
- Žust, A., Dolinar, M., Sušnik, A., Bergant, K. (2016). Fenologija v Sloveniji: priročnik za fenološka opazovanja: ob 65. letnici delovanja državne fenološke mreže. Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija RS za okolje, Ljubljana.



Kanjir U., Skudnik M., Kokalj Ž. (2023). Določevanje fenoloških faz izbranih drevesnih vrst s časovnimi vrstami posnetkov MODIS. Geodetski vestnik, 67 (2), 165-180.

DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2023.02.165-180>

dr. Urša Kanjir, univ. dipl. inž. geod.

Znanstvenoraziskovalni center Slovenske akademije znanosti in umetnosti, Inštitut za antropološke in prostorske študije
Novi trg 2, 1000 Ljubljana
e-naslov: ursa.kanjir@zrc-sazu.si

izr. prof. dr. Žiga Kokalj, univ. dipl. geog.

Znanstvenoraziskovalni center Slovenske akademije znanosti in umetnosti, Inštitut za antropološke in prostorske študije
Novi trg 2, 1000 Ljubljana
e-naslov: ziga.kokalj@zrc-sazu.si

doc. dr. Mitja Skudnik, univ. dipl. inž. gozd.

Gozdarski inštitut Slovenije, Oddelek za načrtovanje in monitoring gozdov in krajine
Večna pot 2, 1000 Ljubljana
UL, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire
Večna pot 83, 1000 Ljubljana
e-naslov: mitja.skudnik@gozdis.si