

VPLIV SVETLOBNE ONESNAŽENOSTI NA FENOFAZO OLISTANJA: PRIMER DOLINE VOGLAJNE IN ZGORNJEGA POSOTELJA

Mojca Rajh

Mag., geografije in profesorica biologije
Jakob pri Šentjurju 27
3230 Šentjur
mojca.rajh2@gmail.com

Igor Žiberna

Dr., prof. geografije in zgodovine, red. prof.
Oddelek za geografijo
Filozofska fakulteta
Koroška cesta 160, SI - 2000 Maribor, Slovenija
igor.ziberna@um.si

Danijel Ivajnsič

Dr., profesor biologije in geografije, izr. prof.
Oddelek za biologijo in Oddelek za geografijo
Fakulteta za naravoslovje in matematiko in Filozofska fakulteta
Univerza v Mariboru
Koroška cesta 160, SI2000 Maribor, Slovenija
dani.ivajnsic@um.si

Nataša Pipenbaher

Dr., uni. dipl. inž. kmetijstva, doc.
Oddelek za biologijo
Fakulteta za naravoslovje in matematiko
Univerza v Mariboru
Koroška cesta 160, SI-2000 Maribor, Slovenija
natasa.pipenbaher@um.si

UDK: 910:581.9:574:528.8

COBISS: 1.01

Izvleček

Vpliv svetlobne onesnaženosti na fenofazo olistanja: primer doline Voglajne in zgornjega Posotelja

Svetlobno onesnaženje je ena od oblik onesnaževanja, do katere je privedla človekova želja po daljšanju svetlega dela dneva. Da svetloba v nočnem času predstavlja onesnaževanje, smo tudi v Sloveniji ugotovili že pred desetletji, vendar je stanje na tem področju, kljub Uredbi o mejnih vrednostih svetlobnega onesnaževanja, še vedno zelo zaskrbljujoče. Glavni vir le-tega je javna razsvetljava, pogosto pa so preveč in nepravilno razsvetljeni tudi različni objekti. Posledice svetlobnega onesnaževanja so astronomske, biološke, okoljske, zdravstvene in ekonomske. S pomočjo podatkov daljinskega zaznavanja, terenskih opazovanj in prostorske analize smo uspeli dokazati, da svetlobno onesnaženje na območju doline Voglajne in zgornjega Posotelja vpliva na fenofazo olistanja, tako na nivoju habitata, ki ga tvorijo mali lesni krajinski elementi, kot na nivoju vrste navadna breza (*Betula pendula*).

Ključne besede

LiDAR, navadna breza, normalizirani diferencialni vegetacijski indeks (NDVI), sij neba

Abstract

The effect of light pollution on the leafing phenophase: the key study of Voglajna valley and the upper Posotelje

Light pollution is one of the forms of pollution triggered by man's desire to lengthen the day. Its negative effects on the environment were discovered decades ago. However, the situation in Slovenia, despite the Regulation on limit values of light pollution, is still very alarming. The main source is public lighting. Often various buildings are too much or incorrectly illuminated. The consequences of light pollution are astronomical, biological, environmental, and economic. They can influence human health as well. Based on remote sensing data, field observations and spatial analysis, it was proved that light pollution in the area of the Voglajna valley and the upper Posotelje affects the leaf-development phenophase (leafing), both at the level of the habitat formed by small wooden landscape elements, and at the species level of the common birch (*Betula pendula*).

Keywords

Betula pendula, LiDAR, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Skyglow

1. Uvod

Svetloba je eden najpomembnejših dejavnikov, ki soustvarja življenjske pogoje organizmom na Zemlji hkrati pa vpliva na njihov dnevni ritem oziroma cikel (Kreitzman in Foster 2010). Glede na vir svetlobe ločimo naravno in umetno svetlobo. Slednja, kot že ime pove, ni naravnega nastanka, ampak jo je ustvaril človek. Izuma žarnice in izmeničnega električnega toka sta v relativno kratkem času svetlobo pripeljala v večino domov razvitega sveta. Posledično se je kmalu pojavila tudi težnja po podaljševanju svetlega dela dneva oziroma nočni razsvetljavi. Interakcija zagotavljanja ekonomske produktivnosti in osvetljevanje površja v nočnem času, pa je privedla do prekomernega osvetljevanja in s tem svetlobnega onesnaževanja.

V Sloveniji so strokovnjaki na tovrstno obliko okoljskega obremenjevanja začeli opozarjati že pred desetletji, kljub temu pa še danes glavni vir svetlobnega onesnaževanja predstavlja javna razsvetljava ob cestah. Pogosto so preveč in nepravilno razsvetljeni tudi razni sakralni, kulturni, reklamni, proizvodni in drugi objekti. Svetila so velikokrat tudi nepravilno nameščena. Ne osvetljujejo le tal, temveč tudi neposredno okolico. Stanje še dodatno okrepijo številčnost, jakost in spekter nameščenih svetil (Medmrežje 1). Posledice svetlobnega onesnaževanja so zato proučevane z različnih znanstvenih področjih: astronomija, biologija, ekologija, ekonomija, medicina, itd. (Falchi in sod. 2011; Žiberna in Ivajnšič 2020).

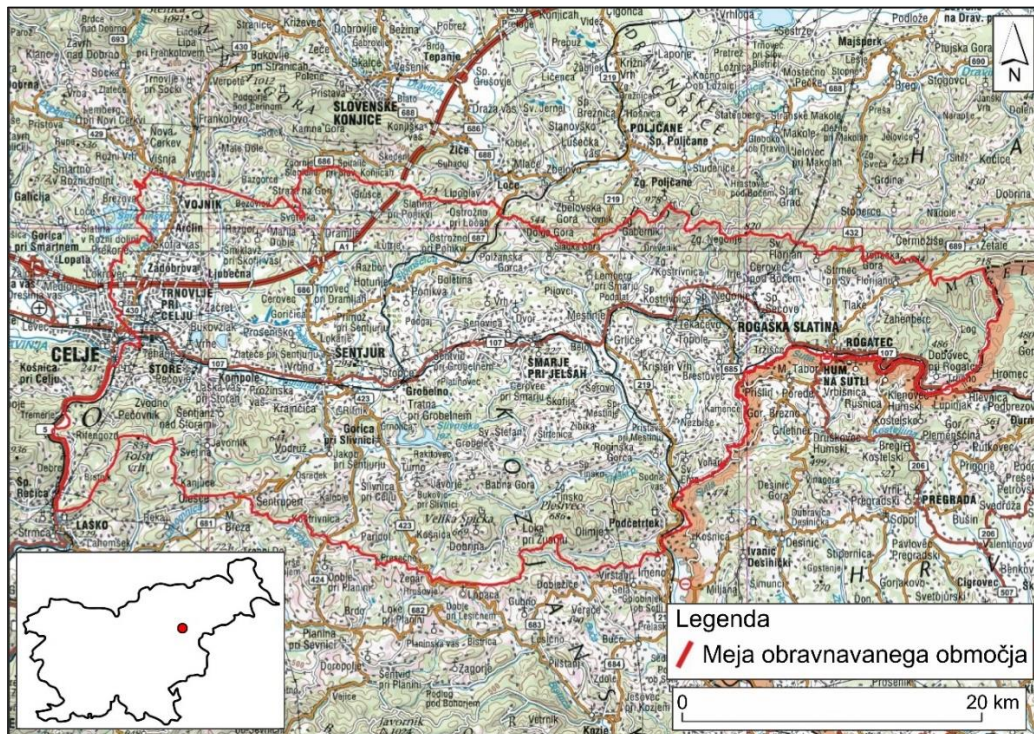
Omenjeno prekomerno osvetljevanje cest in raznih objektov je privedlo do pojava sija neba. O siju neba govorimo, kadar umetna svetloba v nočnem času uhaja v nebo in poveča naravno osvetljenost neba (Uradni list 81/2007 2007). Povečana osvetljenost nočnega neba, ob slabi vidljivosti zaradi bleščanja, negativno vpliva na bioritem živali, ki so aktivne ponoči (LIFE+ Life at Night project 2022). Ljudje, ki so ponoči izpostavljeni svetlobi, imajo moteno tvorbo melatonina, kar lahko dolgoročno privede do različnih obolenj, kot so motnje spanja in različna rakava obolenja (Chepesiuk 2009; Falchi in sod. 2011; Fonken in Nelson 2011; Stevens in Zhu 2015; Touitou, Reinberg, in Touitou 2017). Tudi pri rastlinah je Matzke že leta 1936 opazil, da nekatere vrste listavcev v bližini uličnih svetilk jeseni dlje časa ohranjajo svoje liste. Zaradi tega so le-te pozno jeseni in pozimi izpostavljene večjemu tveganju za poškodbe zaradi zmrzali. V teoriji bi sij neba v nočnem času lahko povzročil spremembo in učinkovitost fotosinteze (Raven in Cockell 2006), kar potrujeta Meravi in Kumar (2020).

Zaradi zgoraj omenjenih dejstev in manjka vegetacijskih študij v povezavi s svetlobnim onesnaženjem smo si v raziskavi zastavili naslednja raziskovalna vprašanja: je vpliv svetlobnega onesnaženja na male lesne krajinske elemente zaznaven s časovno serijo daljinsko zaznanih podatkov (SENTINEL-2 satelitskih podob)? (1); Zanimalo nas je tudi, ali obstajajo razlike v vrednostih normiranega diferencialnega vegetacijskega indeksa (NDVI) ter frekvenci odbojev LiDAR točk v treh višinskih nivojih krošenj (nizki, srednji in visoki vegetaciji) med enakimi habitati na osvetljenem in manj osvetljenem delu raziskovanega območja (2); Na primeru vzorca navadne breze (*Betula pendula* Roth) (n=15) pa smo skušali ugotoviti, kako pristanost oziroma odsotnost umetne svetlobe v nočnem času vpliva na fenofazo olistanja (3).

2. Metode dela

2.1 Območje raziskave

Območje raziskave obsega dolino Voglajne in zgornjega Posotelja, ki se v smeri Z-V razprostira med Celjem in mejnim območje s Hrvaško (Dobovec) (Slika 1). Največji vodotok na območju raziskave predstavlja reka Voglajna, ki se v Celju steka v reko Savinjo. Relief sestavljajo doline reke Voglajne ter gričevja (Voglajnsko gričevje ter gričevja zgornjega Posotelja). Skozi območje poteka regionalna cesta 107, ki povezuje večja naselja, kot so Celje, Štore, Šentjur, Šmarje pri Jelšah, Rogaško Slatino in Rogatec.



Slika 1: Območje raziskave obsega dolino Voglajne in Zgornjega Posotelja – na sliki je označeno z rdečo črto.

Vir: DPK500, lastno kartiranje 2020.

2.2 Daljinsko zaznavanja svetlobnega onesnaževanja

Na spletnem portalu (Earth Observation Group 2021) smo pridobili mesečne podatke (georeferencirani sloji mesečnih povprečij) satelita Suomi National Polar-orbiting Partnership (Suomi NPP) za časovno okno 2014-2019 ($n=72$), ki je v lasti Ameriške agencije za oceane in atmosfero (National Oceanic and Atmospheric Administration 2022) in ima nameščenih več operativnih senzorjev. V našem primeru smo uporabili produkt senzorja Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS), ki uporablja 22 tipal. Eno izmed njih snema površje Zemlje v dnevno-nočnem kanalu (Day/Night band) (Žiberna in Ivajnsič 2018). Vrednosti sevane svetlobe (radianca) so izražene v nanowatih na steridian na kvadratni centimeter ($nW/sr\ cm^2$).

2.3 Opredelitev osvetljenega in neosvetljenega predela raziskovanega območja na podlagi satelitskih podob Suomi (VIIRS)

V programskem okolju ArcGIS (ESRI 2019) smo izdelali maskiran sloj vseh 72 podob ter s pomočjo orodja Curve fit (USGS 2013) izračunali prostorski trend spreminjanja svetlobne onesnaženosti na raziskovanem območju. Več-letno stanje svetlobne onesnaženosti in identificirani prostorski trend nam je omogočil izračun pragu (radianca = $1,1 \text{ nW/sr cm}^2$), ki je ločil osvetljene in »neosvetljene« (manj osvetljene) predele raziskovanega območja. Ta kategorična spremenljivka je v nadaljevanju predstavljala temelj za ugotavljanje vpliva svetlobne onesnaženosti na normiran diferencialni vegetacijski indeks (NDVI) v malih lesnih krajinskih elementih (Kokalj in sod. 2020).

2.4 Gradnja časovne serije podob satelita SENTINEL-2

Za potrebe nadaljnje analize smo uporabili več-spektralne podobe satelita SENTINEL-2 s prostorsko ločljivostjo 10 metrov, v zapisu NetCDF v programskem okolju SNAP (European Space Agency 2022). Podatki so dostopni na spletnem portalu EarthExplorer (Medmrežje 2). Pri pripravi večletne časovne serije (tri vegetacijske sezone [2017–2019]) podob SENTINEL-2 smo implementirali filter oblačnosti (<10 %). Posledično smo izgubili podobe, ki kažejo stanje vegetacijskega pokrova za mesec maj 2017, februar in marec 2018 ter maj in avgust 2019.

2.5 Računanje normiranega diferencialnega vegetacijskega indeksa (NDVI)

Pripravljena časovna serija SENTINEL-2 podob, natančneje spektralna kanala 4 (rdeči) in 8 (bližje-infrardeči), sta nam v naslednjem koraku omogočila računanje vegetacijskega indeksa NDVI (posredni kazalec o biomasi vegetacije) za vsak časovni presek (mesec) v treh vegetacijskih sezonah. Znotraj pridobljene časovne vrste NDVI smo skušali zaznati razlike v biomasi vegetacije (ozelenitvi) pri malih lesnih krajinskih elementih (v nadaljevanju MLKE) bodisi na ponoči osvetljenih ali »neosvetljenih« (manj osvetljenih) predelih raziskovanega območja. Podatke o MLKE smo pridobili na Zavodu Republike Slovenije za varstvo narave (ZRSVN) (Kokalj in sod. 2020).

Časovno serijo NDVI smo prostorsko porezali po raziskovalnem območju ter primerjali z rezultatom karte osvetljenih in »neosvetljenih« delov območja. Zaradi prostorske neuravnoteženosti osvetljene in »neosvetljene« površine v raziskovanem območju smo ciljni vzorec ($n=12000$) oblikovali tako, da smo preverili koliko MLKE se nahaja v osvetljenem delu in nato naključno izbrali enako število MLKE znotraj »neosvetljenega« območja. Za vsako zaplato MLKE smo nato izračunali serijo kazalcev NDVI (povprečne vrednosti slikovnih enot) od januarja 2017 do novembra 2019). Podatke smo nato izvozili v Microsoft Office Excel (2016) in analizirali sezonski režim anomalij NDVI v osvetljenem in »neosvetljenem delu« raziskovalnega območja. Morebitno značilnost razlik v nadzemni biomasi (kazalcu NDVI) ob začetku in koncu vegetacijske sezone smo preverjali s preizkusom enakosti varianc (ang. F-Test Two-Sample for Variances) in preizkusom enakosti povprečij (ang. t-Test Two-Sample Assuming Equal Variances).

2.6 Oblak LiDAR točk

Za vsako drevo (navadna breza [*Betula pendula*]), ki smo ga predhodno izbrali na terenu, smo poiskali oblak LiDAR točk (Agencija Republike Slovenije za okolje 2022), ki kaže stanje v mesecu avgustu leta 2014. Gre za točke v tridimenzionalnem (3D) prostoru. X in Y koordinati predstavljata geografski položaj, Z koordinata pa višino.

Bolj kot je krošnja olistana in gosta (večja biomasa), bolj razpršen je odboj laserskega snopa. Vsako drevo smo obkrožili s poligonom, tako da je zaobjel krošnjo, ter izračunali frekvenco laserskih odbojev. Le-te smo razdelili na tri višinske nivoje: nizka vegetacija (angl. low vegetation), srednja vegetacija (angl. medium vegetation) in visoka vegetacija (angl. high vegetation) (Agencija Republike Slovenije za okolje 2022). Pripravili smo frekvenčno tabelo odbojev po višinskih nivojih v kategorijah »neosvetljeno«, osvetljeno–rumena svetloba, in osvetljeno–LED svetloba. Zaradi prekrivanja nekaterih krošenj (ne samostoječe drevo=sestoj) smo prvoten vzorec (n=25) morali zmanjšati na 13 primerkov. S prilagojenim hi-kvadrat preizkusom (ang. Chi Square Test) smo ugotavljali, ali na primeru navadne breze prihaja do značilnih razlik v frekvenci laserskih odbojev po višinskem nivoju (nizka, srednja, visoka vegetacija) in kategoriji (ne)osvetljenosti (»neosvetljeno«, osvetljeno–rumena svetloba, in osvetljeno–LED svetloba).

2.7 Fenološka opazovanja navadne breze (*Betula pendula*)

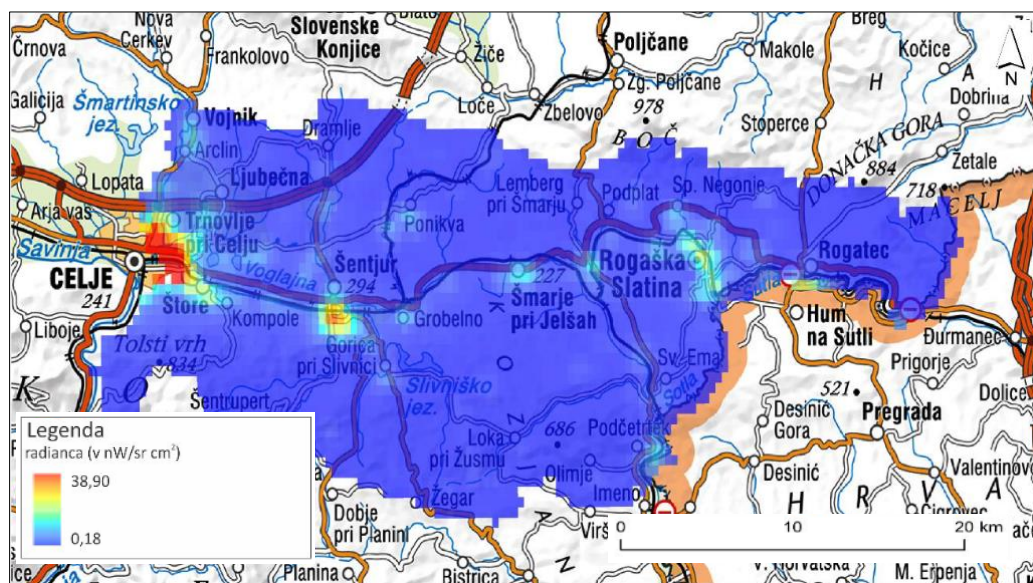
Letni razvojni cikel rastlin je razdeljen na posamezne faze, ki jih imenujemo fenološke faze. Spremembe v fenologiji so eden od najbolj očitnih odzivov na spremembe v okolju (Žust 2015). Od vseh listopadnih dreves navadna breza uspeva najdlje na severu, vse do subpolarnega pasu. V Sloveniji je naravno razširjena, redkejša je le v priobalnem pasu. Je enodomno drevo, pri katerem lahko opazujemo fenološke faze olistanja, začetek cvetenja, rumenenje in odpadanje listja (Žust 2015). Opazovali smo odpadanje listja, ki označuje začetek pozne jeseni. Chaney (2002) izpostavlja, da je vpliv svetlobe na navadno brezo visok, kar je bil tudi eden izmed razlogov, da smo se odločili fenološko opazovati prav to vrsto. Opazovali smo spreminjanje olistanosti krošenj in konec odpadanja listja, ki se zgodi na koncu vegetacijske sezone, za petindvajset izbranih navadnih brez. Za opazovanje smo izbrali odrasla in zdrava drevesa, saj bi se lahko v primeru boleznih odpadanje listov pojavilo prej, s tem pa naši rezultati ne bi bili primerljivi. Spremljali smo breze, osvetljene z rumeno svetlobo in LED svetlobo, ter breze, ki se nahajajo v »temi«. Vsako brezo smo večkrat na teden opazovali in fotografirali. Olistanost krošenj oziroma odpadanje listja smo spremljali od septembra 2020 do vključno januarja 2021. Listje navadne breze po navadi začne odpadati v času pozne jeseni, z začetkom 1. dekadde novembra (Žust 2015).

Iz pridobljenih podatkov smo ocenili stopnjo olistanosti krošenj posameznih brez. Stopnjo olistanosti smo razdelili v pet razredov: razred 4 (olistanost od 76 do 100 %), razred 3 (olistanost od 51 do 75 %), razred 2 (olistanost od 26 do 50 %), razred 1 (olistanost od 1 do 25 %) ter razred 0 (olistanost od 0 do 0,99 %).

3. Rezultati z diskusijo

3.1 Stanje svetlobne onesnaženosti na obravnavanem območju

Na območju doline Voglajne in Zgornjega Posotolja so svetlobno najbolj onesnažena območja v okolici Celja ter Rogaške Slatine, precej svetlobno onesnažena so tudi območja Rogatca, Šmarja pri Jelšah, Šentvida pri Grobelnem, Grobelna, Šentjurja in Štor (Slika 2). Svetlobna onesnaženost omenjenih mest je še posebej izrazita v oblačnem vremenu, ko pride do odboja svetlobe od oblakov.

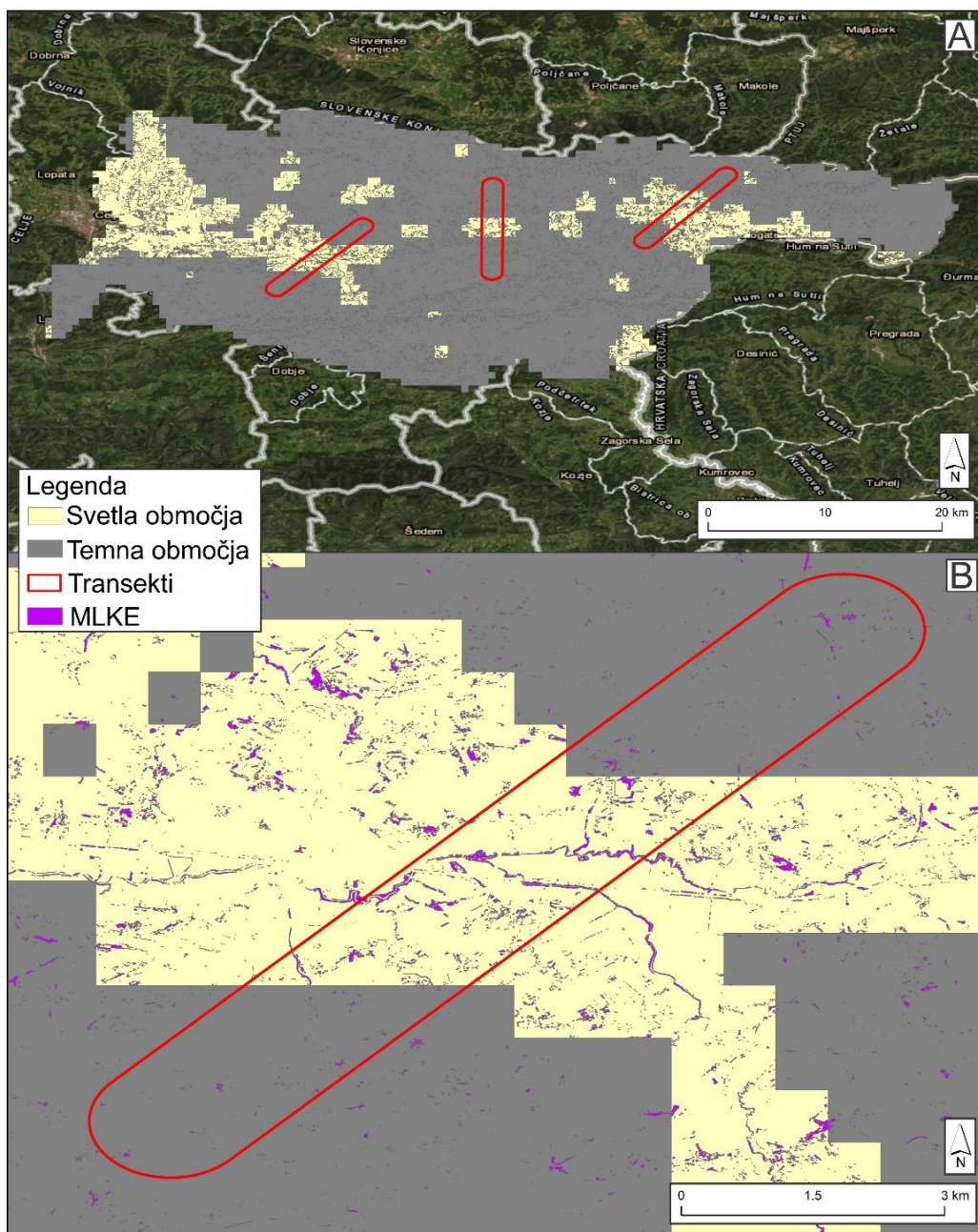


Slika 2: Povprečno stanje osvetljenosti površja raziskovanega območja v letu 2019.
Vir: Earth Observation Group 2021.

Analiza stanja in računanje prostorskega trenda svetlobne onesaženosti med letom 2014 in 2019, sta omogočila pripravo Slike 3, tj. opredelitev osvetljenega (rumena barva) in »neosvetljenega« (siva barva) območja. Zaznavno je površinsko nesorazmerje v korist ponoči »neosvetljenimi« (manj osvetljenim) predelom območja kar je, z vidika okoljskega obremenjevanja, vzpodbuden podatek. Rdeči poligoni označujejo tri transekte (preseke) znotraj katerih smo obravnavali MLKE (vijolična barva). Zagotovili smo, po številu zaplat MLKE, uravnotežen vzorec glede na kategorijo osvetljenosti (osvetljeno, »neosvetljeno«). Posledično smo kazalce NDVI v časovnem razponu 2014-2019 računali za 12000 zaplat MLKE v posamezni kategoriji osvetljenosti.

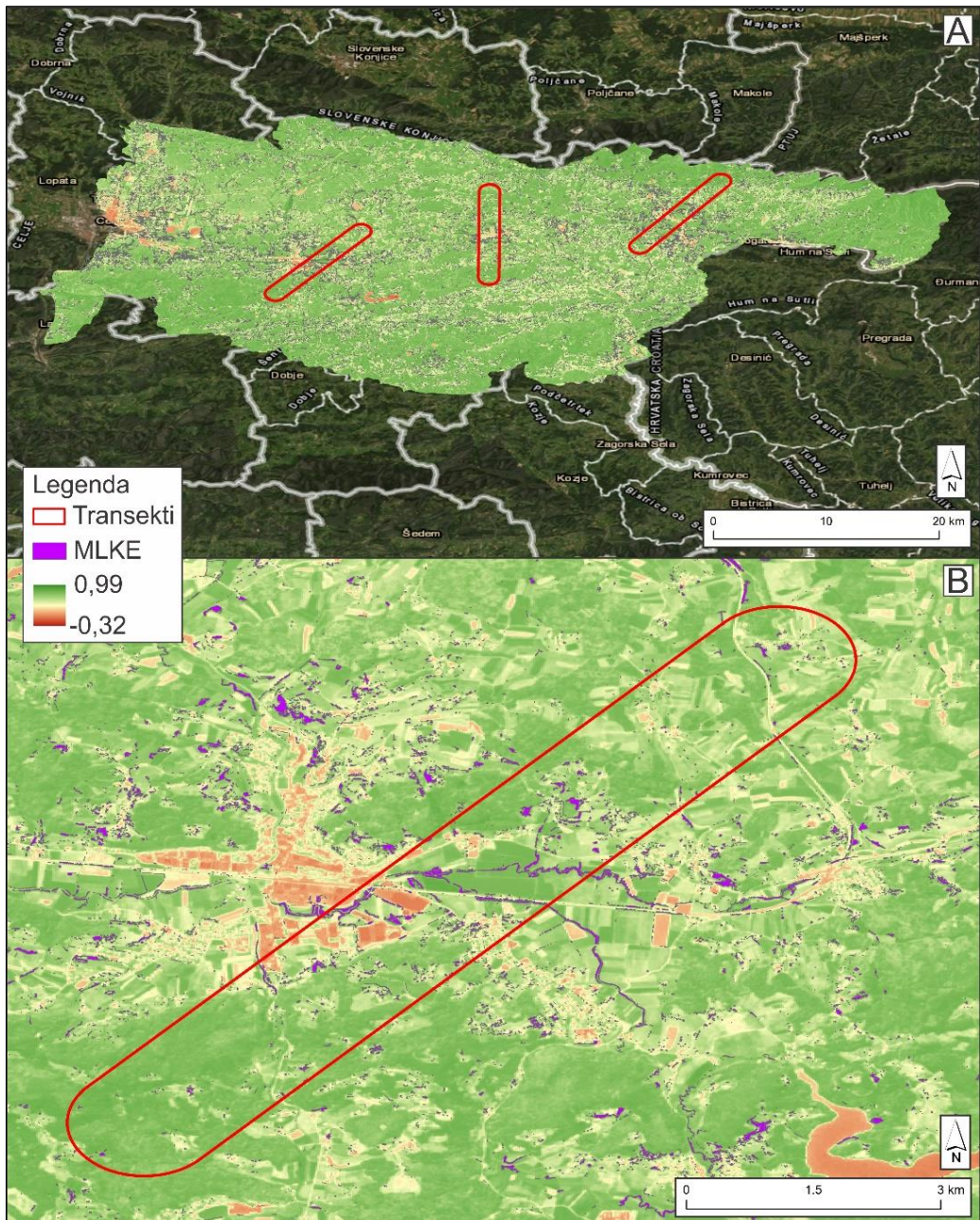
3.2 Letna dinamika vegetacijskega indeksa NDVI na izbranih osvetljenih in »neosvetljenih« zaplatah MLKE

Umetno osvetljevanje neba v času noči spremeni potek naravnih svetlobnih ciklov rastlin, na katere se lahko različno odzivajo. S spremljanjem letne dinamike vrednosti NDVI na izbranih osvetljenih in »neosvetljenih« zaplatah MLKE ocenjujemo razlike v fenofazi olistanja (Slika 4, Slika 5).



Slika 3: Osvetljeni in »neosvetljeni« predeli raziskovanega območja s tremi transekti (preseki) (A) ter povečava enega z prikazanimi zaplatami MLKE (B).

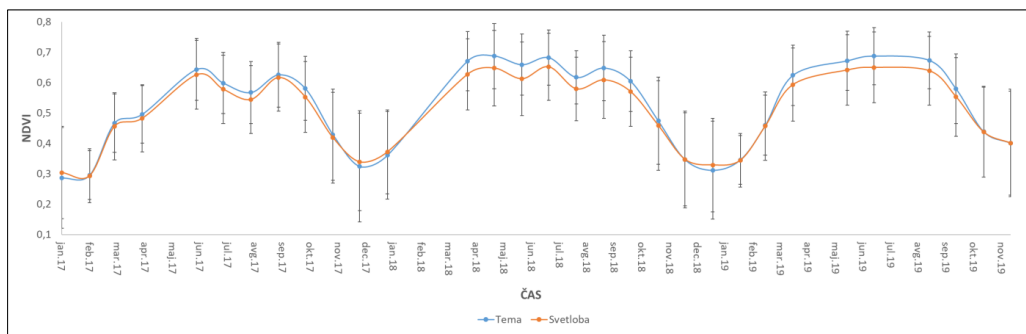
Vir: Agencija Republike Slovenije za okolje 2022; Earth Observation Group 2021, lastno kartiranje 2021.



Slika 4: Prikaz sloja NDVI in zaplat MLKE na obravnavanem območju (A) ter izsek prikaza enega od transektov (presekov) (B).

Vir: Medmrežje 2, lastno kartiranje 2021.

Gibanje vrednosti NDVI v zaplatah MLKE med letoma 2017 in 2019 (Slika 5) v osvetljenem in »neosvetljenem« delu raziskovanega območja zaobjema tri vegetacijske sezone. Variacijski razmik kazalca NDVI nakazuje značilno sezonskost. Razlike med obema kategorijama osvetljenosti so pričakovano prepoznavne bodisi v začetku ali koncu vegetacijske sezone. Ko se začne tvorba listov (fenofaza olistanja) in vrednosti NDVI začnejo naraščati ali, ko listi odpadajo in se vrednosti NDVI posledično pričnejo zmanjševati. Povedano drugače, v jesenskem in zimskem času je biomasa oziroma olistanost dreves v ponoči osvetljenih predelih obravnavanega območja večja v primerjavi z »neosvetljenim« predelom.



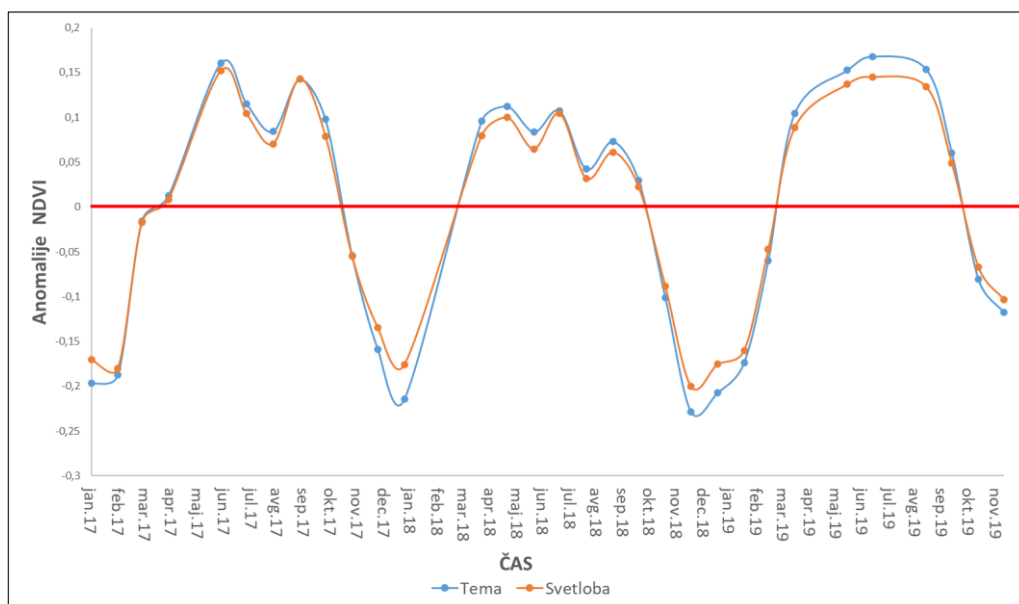
Slika 5: Gibanje vrednosti NDVI med leti 2017–2019.

Vir: Medmrežje 2.

Z izračunom anomalij vrednosti NDVI za posamezno zaplato MLKE in posledično odpravo vpliva sezonskosti, so zgoraj opisane razlike med obema kategorijama osvetljenosti še bolj zaznavne (Slika 6). Razkorak je največji v mesecih november, december, januar, februar in marec, ko so vrednosti NDVI v osvetljenih MLKE večje. Opazimo lahko tudi obratno stanje v pozni pomladanskih ter poletnih mesecih, ko so vrednosti NDVI v »neosvetljenih« zaplatah MLKE višje od tistih v kategoriji osvetljeno.

Seveda na olistanost vegetacije, ki tvori MLKE, vpliva več različnih dejavnikov (npr. vlaga v tleh, dostopnost vode, tip in kakovost prsti, nadmorska višina, lega, ekspozicija, itd.). Če bi torej želeli ugotoviti vzroke za zaznано stanje bi zagotovo potrebovali mnogotere okoljske podatke, s katerimi bi morda bolje pojasnili opisani prostorski vzorec kar sicer presega namen in cilje te raziskave.

Neglede na to, smo v nadaljevanju preverili še statistično značilnost razlik v povprečni vrednosti NDVI za obravnavane MLKE ob konca vegetacijske sezone (skupaj 9 mesecev) po kategoriji osvetljenosti (Preglednica 1 in Preglednica 2).



Slika 6: Anomalije normiranega diferencialnega vegetacijskega indeksa.

Vir: Medmrežje 2.

Preglednica 1: Povzetek preizkusa enakosti varianc (F-test).

Spremenljivka	»Neosvetljeno«	Osvetljeno
Povprečna vrednost	-0,16904	-0,14884
Varianca	0,003271	0,002284
Število razredov	9	9
df	8	8
F vrednost	1,432496	
P(F<=f) (en rep)	0,311564	
F (dva kritična repa)	3,438101	

Vir: Medmrežje 2; lastni izračuni 2021.

Preglednica 2: Povzetek preizkusa enakosti povprečij (T-test).

Spremenljivka	»Neosvetljeno«	Osvetljeno
Povprečna vrednost	-0,16904	-0,14884
Varianca	0,003271	0,002284
Število razredov	9	9
Df	16	
t vrednost	-0,81325	
P(T<=t) (en rep)	0,214006	
t (en kritičen rep)	1,745884	
P(T<=t) (dva repa)	0,428012	
t (dva kritična repa)	2,119905	

Vir: Medmrežje 2; lastni izračuni 2021.

Rezultati sicer ne kažejo statistično značilnih razlik v povprečni vrednosti NDVI po MLKE v zimskih mesecih obravnavanih treh sezon med svetlobnima kategorijama »neosvetljeno in osvetljeno. Vzrok statistične neznačilnosti je velikost vzorca, ki je v našem primeru zajemal le 9 mesecev ($df=8$). Predpostavljamo, da bi v primeru povečanja vzorca (vsaj 10 sezona ali več) dosegli statistično značilnost razlik v povprečni vrednosti NDVI med osvetljenimi in »neosvetljenim« zaplatami MLKE.

3.3 Vpliv svetlobnega onesnaževanja na primeru navadne breze (*Betula pendula*)

Na obravnavanem območju smo preučevali 25 osebkov navadne breze (*Betula pendula*). Trinajst dreves je bilo v nočnem času osvetljenih z LED svetlobo, štiri so bile osvetljene z rumeno svetlobo, osem pa ni bilo svetljenih. Izziv je bilo najti primere brez, osvetljenih z rumeno svetlobo, saj so »bele« LED svetilke skoraj popolnoma nadomestile tiste, ki svetijo v toplejšem, rumenem spektru.

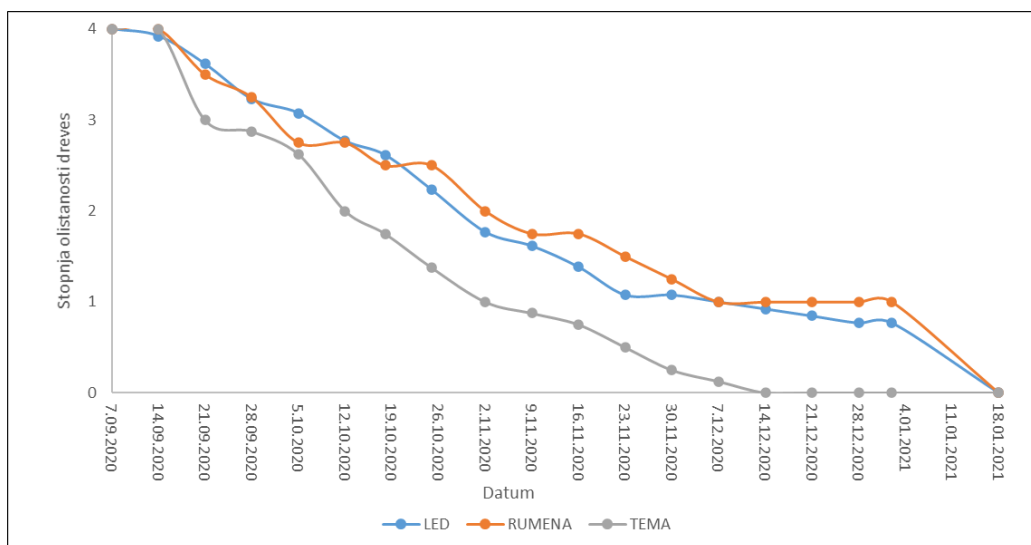
Že z vizualnimi opazovanji lahko opazimo, da svetlobno onesnaženje vpliva na odpadanje listja navadne breze. Svetloba vpliva tudi na čas odpadanja listja. Pri brezah, ki so ponoči osvetljene so listi dlje časa zeleni (funkcionalni) (Slika 7A) in ostajajo dlje časa na drevesih (Slika 7B).



Slika 7: Olistanost navadne breze ob svetilki (A) ter primer osvetlitve listja navadne breze pomoči (B).

Vir: Lastno fotografiranje 2020.

Slika 8 prikazuje stopnjo olistanosti dreves navadne breze v odvisnosti od časa in tipa osvetljenosti. Olistanost smo spremljali od 7. septembra 2020 do konca vegetacijske sezone obravnavanih brez (do 18. januarja 2021). Najprej je začelo listje odpadati brezam, ki v nočnem času niso bile osvetljene. Tem je listje odpadlo najkasneje do 14. decembra 2020. Listje osvetljenih brez (LED in rumena) je odpadlo vse do 18. januarja 2021. Dokazujemo, da prisotnost kakršnekoli svetlobe (rumena, LED) brezam umetno podaljša vegetacijsko sezono. Brezam, ki niso bile osvetljene, je v povprečju listje odpadlo 35 dni prej kot brezam, ki so bile osvetljene.



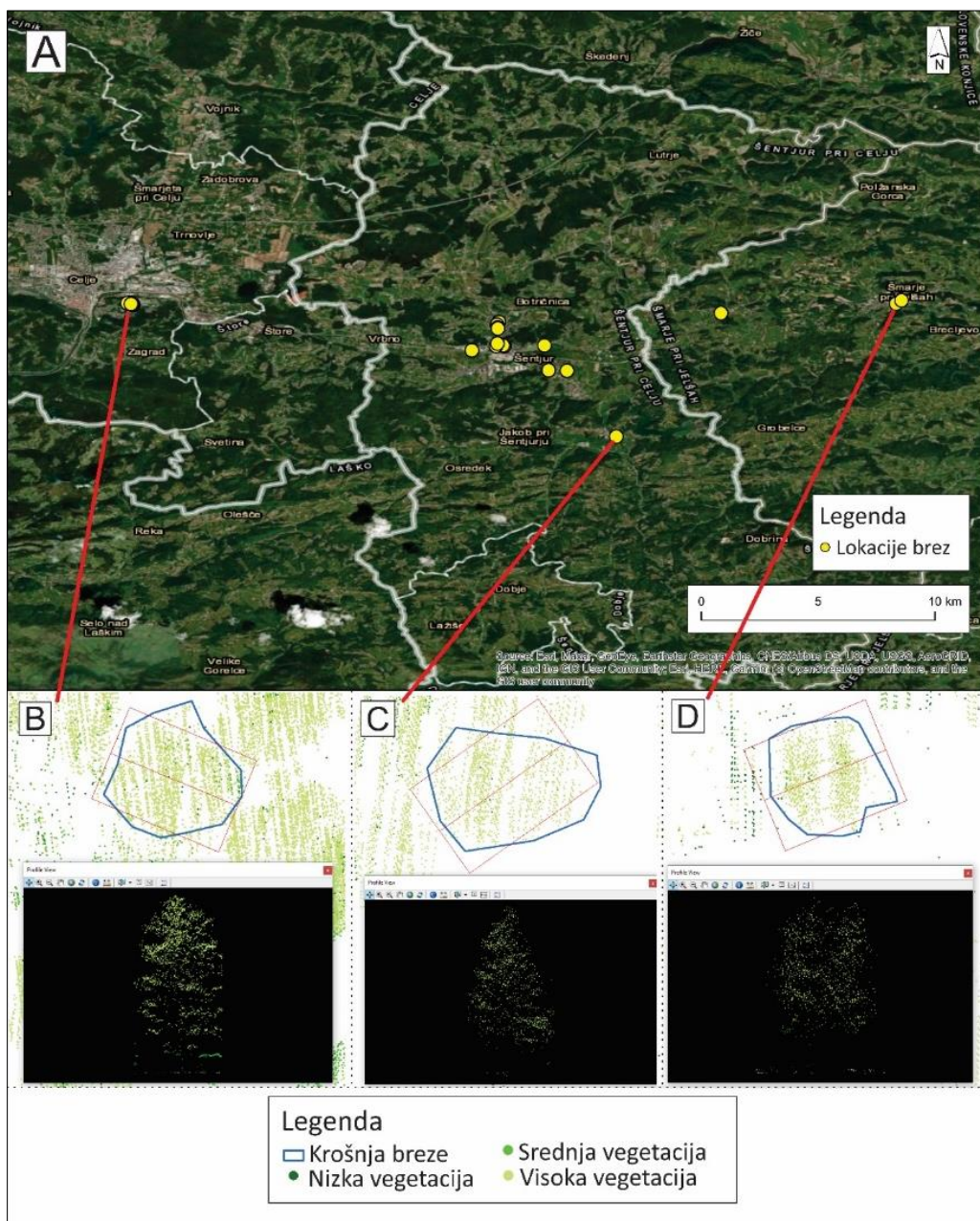
Slika 8: Stopnja olistanosti navadne breze po tipu osvetljenosti v obdobju september 2020 do januar 2021.

Vir: Lastne meritve 2020–2021.

3.4 Gostota odboja lidarskih točk osvetljenih in »neosvetljenih« navadnih brez (*Betula pendula*)

V nadaljevanju smo proučevali LiDAR oblak točk trinajstih samostojećih navadnih brez (*Betula pendula*). Lokacije in tri-razsežni diagrami treh krošenj so prikazani na Sliki 9. Za vsako posamezno navadno brezo smo pripravili podatke o odbojih, ki so po višini kategorizirani v razrede nizka, srednja in visoka vegetacija. Na podlagi števila kategoriziranih LiDAR odbojev smo spremljali spreminjanje olistanosti navadnih brez v najnižjih, srednjih in visokih pasovih krošenj po tipu osvetlitve (neosvetljeno, LED svetloba, rumena svetloba) (Preglednica 3).

Zaradi neuravnoteženega števila dreves po kategoriji osvetlitve smo se v nadaljevanju analize naslonili na povprečne vrednosti LiDAR odbojev. S hi-kvadrat statistiko smo ugotavljali, ali med različno osvetljenimi brezami (neosvetljene, osvetljene z LED svetlob in osvetljene z rumeno svetlobo) obstajajo značilne razlike v številu LiDAR odbojev (Preglednica 4). Analizo smo nato ponovili za vsak višinski sloj vegetacije (nizka, srednja in visoka).



Slika 9: Lokacije navadnih brez (A) ter odboj lidarskih snopov (B, C in D).
Vir: Agencija Republike Slovenije za okolje 2022; lastno kartiranje 2021.

Preglednica 3: Število LiDAR odbojev na posameznem drevesu glede na višinsko kategorijo krošnje in tip osvetlitve.

N	Tip svetlobe	Nizka vegetacija	Srednja vegetacija	Visoka vegetacija	Skupaj
1	led	4	5	1085	1094
2	tema	23	43	1179	1245
3	rumena	45	35	852	932
4	rumena	5	40	857	902
5	led	6	115	711	832
6	led	1	2	993	996
7	tema	2	87	1423	1512
8	led	6	17	1259	1282
9	led	10	33	1058	1101
10	led	15	19	1946	1980
11	led	16	64	1707	1787
12	led	15	52	1084	1151
13	led	26	78	2181	2285

Vir: Agencija Republike Slovenije za okolje 2022, lastni izračuni 2021

Preglednica 4: Hi-kvadrat statistika glede na višinski sloj in tip osvetlitve dreves ($\alpha=0,05$).

Višinski sloj	Tip osvetlitve	Hi-kvadrat vrednost	Kritična vrednost	P-vrednost
Nizka vegetacija = nizki pas krošnje	Neosvetljeno	7,3	5,99	0,026
	LED svetloba			
	Rumena svetloba			
Srednja vegetacija = srednji pas krošnje	Neosvetljeno	10,5	5,99	0,005
	LED svetloba			
	Rumena svetloba			
Visoka vegetacija = visoki pas krošnje	Neosvetljeno	123,9	5,99	1,3E-27
	LED svetloba			
	Rumena svetloba			

Vir: Agencija Republike Slovenije za okolje 2022, lastno kartiranje 2021.

Skupno število odbojev lidarskih točk je največje pri brezah, ki so osvetljene ponoči z LED svetlobo, sledijo tiste breze, ki so v temi, najmanj pa imajo odboja lidarskih točk breze, ki so osvetljene z rumeno svetlobo. V sloju nizke vegetacije je bilo največ laserskih odbojev pri tistih brezah, ki so bile osvetljene z rumeno svetlobo. Sledile so breze, ki so v temi, najmanj odbojev pa so imele breze, ki so osvetljene z LED svetlobo. V sloju srednje vegetacije je bilo največ odbojev v temi, medtem ko je bilo število odbojev lidarskih točk pri brezah, ki so osvetljene (LED in rumena svetloba), enako. V visoki vegetaciji je bilo največ odbojev lidarskih točk pri brezah, ki so ponoči osvetljene z LED svetlobo, sledijo pa jim breze, ki so v temi. Najmanj odbojev smo v visoki vegetaciji zaznali pri brezah, osvetljenih z rumeno svetlobo. Na podlagi testne statistike sklepamo, da med različno osvetljenimi brezami obstajajo značilne razlike v številu laserskih odbojev na vseh treh višinskih nivojih krošnje (nizka, srednja in visoka vegetacija).

4. Zaključek

Na območju doline Voglajne in Zgornjega Posotelja so svetlobno najbolj onesnažena območja v okolici Celja ter Rogaške Slatine, precej svetlobno onesnažena pa so tudi območja Rogaške Slatine in Rogatca, Šmarja pri Jelšah, Šentvida pri Grobelnem, Grobelnega, Šentjurja in Štor. Ta naselja vplivajo na svetlobno onesnaženost svoje okolice, še posebej v oblačnem vremenu, ko pride do odboja svetlobe od oblakov. V oblačnem vremenu pride do zlitja svetlobe, območje, ki je osvetljeno, pa se s tem poveča. Najmanj svetlobno onesnažena so območja, ki so manj poseljena, brez večjih prometnic, in območja, ki so neposeljena in/ali pokrita z gozdom.

Pravzaprav težko govorimo o neosvetljenih območjih, saj Slovenija praktično nima temnega neba. Na sij neba ne vplivajo le večja naselja znotraj obravnavanega območja, ampak tudi druga osvetljena naselja. Če so naselja velika in zelo razsvetljena, lahko s svojo emisijo svetlobe vplivajo na sij neba tudi zelo oddaljenih, neposeljenih območij.

K svetlobni onesnaženosti območja največ doprinesejo slabe prakse osvetljevanja, ki se pojavljajo znotraj vseh občin obravnavanega območja. Pomanjkanje znanja se še vedno kaže v nepravilnem montiranju svetilk, ki smo jih množično zaznali tudi ob glavni cesti, ki poteka od mejnega prehoda Dobovec do Rogaške Slatine. Največji problem predstavlja javna razsvetljava naselij in glavnih cest. LED sijalke so skoraj že povsem zamenjale rumene, prav tako pa na terenu opazimo veliko jakost sijalk nekaterih svetilk.

Ekonomsko gledano je menjava rumenih sijalk z LED sijalkami sicer boljša, saj takšna razsvetljava potroši manj električne energije, vendar je z ekološkega vidika takšno početje vse prej kot pametno, saj se LED svetloba veliko bolj siplje kot rumena svetloba. Na tem mestu lahko izpostavimo da, je zaradi neobčutljivosti senzorja na LED svetlobo na satelitu Suomi VIIRS prikazano stanje svetlobnega onesnaženja v dolini Voglajne in zgornjega Posotelja (na Sliki 2) nekoliko podcenjeno. Večina sijalk na tem območju je tipa LED. Te imajo svoj maksimum sija ravno v modrem delu spektra svetlobe, tipalo Suomi VIIRS pa njihovega spektra ne zazna.

Umetno osvetljevanje neba v času noči spremeni potek naravnih svetlobnih ciklov rastlin. Na te spremembe se rastline različno odzivajo. Na podlagi spremljanja večletne dinamike vegetacijskega indeksa (NDVI) na izbranih osvetljenih in »neosvetljenih« malih lesnih krajinskih elementih (MLKE) ugotavljamo, da smo kljub malemu številu sezon (3), z metodologijo daljinskega zaznavanja uspeli dokazati, da svetlobno onesnaženje vpliva na fenofazo olistanja. Predvsem v zimskem času je biomasa oziroma olistanost dreves v ponoči osvetljenih MLKE višja kot v »neosvetljenih« (manj osvetljenih). Sklepamo lahko, da umetno osvetljevanje dreves v nočnem času vpliva na daljšanje vegetacijske sezone dreves. V jesensko/zimskem času tako listje osvetljenih navadnih brez (*Betula pendula*) odpade kasneje kot listje »neosvetljenih« brez. Sezonsko se te razlike ponavljajo. Analiza števila LiDAR odbojev po višinskih kategorijah krošenj (nizka, srednja in visoka vegetacija) in različnem tipu osvetlitve (neosvetljeno, LED in rumena svetloba) kaže značilne razlike ($p > \alpha$; $\alpha = 0.05$).

Listi najprej začnejo odpadati brezam, ki niso osvetljene (v povprečju 35 dni prej kot osvetljenim). Zavedamo se, da lahko na razlike pri olistanosti in odpadanju listja, kljub temu da smo izbrali zdrava drevesa, vplivajo tudi drugi dejavniki, ki jih nismo spremljali.

Menimo, da bi lahko raziskave še izboljšali in razširili, saj je svetlobno onesnaženje eden izmed številnih okoljskih problemov, ki ga povzroča človekova aktivnost v prostori, ne samo na obravnavanem območju, temveč tudi širom Slovenije in sveta. Njegov vpliv je vedno bolj zaskrbljujoč. Ljudje bi se morali začeti zavedati tega problema, vodilni in odločevalci pa ukrepati, da bi se stanje na tem področju izboljšalo.

Literatura

- Agencija Republike Slovenije za okolje 2022: GIS ARSO, LIDAR. Pridobljeno 10. 12. 2022 iz http://gis.arso.gov.si/evode/profile.aspx?id=atlas_voda_Lidar@Arso&culture=en-US.
- Chaney, W. R. 2002: Does Night Lighting Harm Trees?. FAQ, 17, Purdue University, Forestry and Natural Resources.
- Chepesiuk, R. 2009: Missing the Dark - Health Effects of Light Pollution. Environmental Health Perspectives, 117.
- Earth Observation Group 2021: EOG data. Pridobljeno 15. 12. 2022 iz <https://eog.data.mines.edu/products/vnl/>.
- ESRI 2019: ArcGIS Desktop: Release 10.2. Kalifornija, ZDA.
- European Space Agency 2022: Sentinel Application Platform (SNAP). Pridobljeno 11. 10. 2022 iz <https://step.esa.int/main/download/snap-download/>
- Falchi, F., Pierantonio, C., Elvidge, C. D., Keith D. M., Haim A. 2011: Limiting the Impact of Light Pollution on Human Health, Environment and Stellar Visibility. Journal of Environmental Management, 92.
- Fonken, L. K., Nelson, R. J. 2011: Illuminating the deleterious effects of light at night. F1000 Medicine Reports, 3.
- Kokalj, Ž., Stančič L., Noumonvi K. D., in Kobler A. 2020: Testiranje možnosti in izvedba kartiranja krajinskih struktur, pomembnih za biotsko raznovrstnost in blaženje podnebnih sprememb z daljinskim zaznavanjem -podatkovni sloj. ZRC SAZU in GIS. Ljubljana.
- Kreitzman, L., in Foster R. 2010: Seasons of Life: The Biological Rhythms That Enable Living Things to Thrive and Survive. Profile Books.
- LIFE+ Life at Night project 2022: Life at night - Layman`s report.
- Matzke, E. B. 1936: The Effect of Street Lights in Delaying Leaf-Fall in Certain Trees. American Journal of Botany, 23.
- Medmrežje 1 2021: Svetlobno onesnaženje. Društvo temno nebo Slovenije -Dark Sky Slovenia. Pridobljeno 15. 12. 2022 iz <http://www.temnonebo.si/svetlovno-onesnazenje/>.
- Medmrežje 2 2022: USGS EarthExplorer. USGS. Pridobljeno 10. 11. 2022 iz <https://earthexplorer.usgs.gov/>.
- Meravi, N., Prajapati S. K. 2020: Effect Street Light Pollution on the Photosynthetic Efficiency of Different Plants. Biological Rhythm Research, 51.
- Microsoft Corporation 2016: Microsoft Excel.
- National Oceanic and Atmospheric Administration 2022: NOAA. Pridobljeno 12. 12. 2022 iz <https://www.noaa.gov/>.

M. Rajh, I. Žiberna, D. Ivajnsič, N. Pipenbaher: Vpliv svetlobe onesnaženosti...

- Raven, J. A., Cockell C. S. 2006: Influence on Photosynthesis of Starlight, Moonlight, Planetlight, and Light Pollution (Reflections on Photosynthetically Active Radiation in the Universe). *Astrobiology*, 6.
- Stevens, R. G., Zhu Y. 2015: Electric Light, Particularly at Night, Disrupts Human Circadian Rhythmicity: Is That a Problem?. *Philosophical Transactions of the Royal Society B - Biological Sciences*, 370.
- Touitou, Y., Reinberg A., Touitou D. 2017: Association between Light at Night, Melatonin Secretion, Sleep Deprivation, and the Internal Clock: Health Impacts and Mechanisms of Circadian Disruption". *Life Sciences*. 173.
- Uradni list 81/2007: Uredba o mejnih vrednostih svetlobnega onesnaževanja okolja.
- USGS 2013: Curve Fit: A Pixel Level Raster Regression Tool. Pridobljeno 20. 9. 2022 iz <https://earthexplorer.usgs.gov/>.
- Žiberna, I., Ivajnsič D. 2018: Daljinsko zaznavanje svetlobne onesnaženosti v Sloveniji. *Revija za geografijo*, 13.
- Žiberna, I., Ivajnsič D. 2020: Svetlobna onesnaženost na območju pomurske statistične regije. *Revija za geografijo*, 15.
- Žust, A. 2015: Fenologija v Sloveniji - Priročnik za fenološka opazovanja. Pridobljeno 5. 12. 2022 iz <https://meteo.arso.gov.si/uploads/probase/www/agromet/product/document/sl/Brosura0515.pdf>

THE EFFECT OF LIGHT POLLUTION ON THE LEAFING PHENOPHASE: THE KEY STUDY OF VOGLAJNA VALLEY AND THE UPPER POSOTELJE

Summary

In the Voglajna valley and upper Posotelje, the most light-polluted areas are around Celje and Rogaška Slatina, followed by areas Rogatec, Šmarje pri Jelšah, Šentvid pri Grobelnem, Grobelno, Šentjur and Štore. These lit areas affect their rural surroundings, especially in cloudy weather, when light is reflected from the clouds. In fact, it is difficult to talk about unlit areas, since Slovenia practically does not have a dark sky. If the settlements are large and well-lit, they light emissions can influence the radiance of the sky even in very remote, unpopulated areas.

The biggest contributors to light pollution in the study area are incorrect lighting practices, which occur within all considered municipalities. The lack of knowledge is still evident in the field by improper installation of lamps, which was noticed along several main roads. White and blue shining LED lamps with higher intensity have almost completely replaced the yellow ones. From an economic point of view, a step forward as this type of lighting consumes less electricity but from an ecological point of view, doing so is anything but smart, as LED light scattering is more intensive. At this point, we can point out that, owing to LED insensitivity of the Suomi VIIRS satellite, the state of light pollution in the Voglajna valley and upper Posotelje (in Fig. 2) is somewhat underestimated.

However, artificial lighting of the sky at night can change the natural life cycles of plants. Plants can react differently to these changes. Based on remote sensing methodology and multi-temporal analysis of the vegetation index (NDVI) dynamics of selected lit and "unlit" small woody landscape elements (MLKE), we concluded that, despite considering small number of seasons (3), we managed to demonstrate that light pollution affects the leafing phenophase. Especially in winter, the biomass or leafing of trees in the lit MLKE category is recognizably higher comparing to the "unlit" category. We can summarize that light pollution leads to a longer growing season of trees who are forming the MLKE.

In the autumn/winter period, the leaves of lit birches (*Betula pendula*) fall later than the leaves of "unlit" birches. These differences are repeated seasonally. The analysis of the number of LiDAR returns by canopy height categories (low, medium and high vegetation) and different lighting types (unlit, LED and yellow light) showed significant differences as well ($p > \alpha$; $\alpha = 0.05$). Birch trees that are not illuminated at night begin to lose their leaves on average 35 days earlier than those illuminated ones. We are aware that, despite the fact that we chose healthy trees, the differences in leafing and leaf fall can also be influenced by other factors that we did not monitor. We believe that our research could be further improved and expanded, as light pollution is one of the many environmental problems caused by human activity, not only in the area under consideration, but also throughout Slovenia and other economically active regions worldwide. However, its influence is increasingly alarming and people should not ignore it. Moreover, leaders and decision-makers should take action to improve our overall living qualities in accordance with the guidelines and goals of sustainable development.

M. Rajh, I. Žiberna, D. Ivajnsič, N. Pipenbaher: Vpliv svetlobe onesnaženosti...