D. 1.4.2 Študija o klimatskih spremembah, vegetaciji in razširjenosti ciljnih vrst v bodočnosti

Projekt	transPlant – Integralna čezmejna zaščita NATURA 200 rastlinskih vrst in habitatov
Delovni paket	Delovni paket 1; Aktivnost 1.4 - Razširjenost N2K rastlinskih vrst na čezmejnem programskem območju v prihodnosti
Odgovorni partner	UP - Univerza na Primorskem
Vodilni partner	PMR – Prirodoslovni Muzej Rijeka
Avtorji	dr. Anka Kuhelj (UP - Univerza na Primorskem) Špela Čonč, mag. geo. (ZRC SAZU) dr. Peter Glasnović (UP - Univerza na Primorskem) dr. Boštjan Surina (PMR - Prirodoslovni Muzej Rijeka)
Prevod	dr. Peter Glasnović (UP - Univerza na Primorskem) dr. Boštjan Surina (PMR - Prirodoslovni Muzej Rijeka)
Notranja recenzija	dr. Željka Modrić Surina (PMR - Prirodoslovni Muzej Rijeka)

1. Izhodišče

V okviru aktivnosti 1.4 "Razširjenost N2K rastlinskih vrst na čezmejnem programskem območju v prihodnosti" smo pripravili študijo o potencialni razširjenosti treh ciljnih vrst projekta – raznolistne mačine (*Klasea lycopifolia*), Scopolijevega repnjaka (*Arabis scopoliana*) in dinarske smiljke (*Cerastium dinaricum*) – v prihodnjih desetletjih. Raziskava temelji na različnih scenarijih globalnih podnebnih sprememb in preučuje njihov vpliv na razširjenost teh vrst.

Namen študije je bil ugotoviti, kako bodo podnebne spremembe vplivale na razširjenost omenjenih vrst, za katere v okviru projekta pripravljamo smernice za čezmejno varstvo. Študija je temeljila na zbiranju podatkov o trenutni razširjenosti vrst ter okoljskih spremenljivkah, ki opisujejo obstoječe podnebne razmere. Ti podatki so bili nato primerjani z modeli podnebnih spremenljivk za obdobje 2061–2080.

Za modeliranje smo uporabili napredni algoritem, ki se pogosto uporablja za napovedovanje območij okoljske ustreznosti na podlagi vhodnih podatkov.

2. Metodologija

2.1. Podatki o razširjenosti

Podatki o razširjenosti ciljnih vrst so temeljili na terenskih raziskavah, herbarijskih zbirkah, strokovni literaturi in javnih podatkovnih bazah (npr. GBIF – Global Biodiversity Information Facility). Zbrane podatke smo s pomočjo GPS naprav in spletnih GIS aplikacij georeferencirali v koordinatnem sistemu WGS84. Zaradi zahtev modeliranja smo podatke razredčili na minimalno razdaljo 1 km, da bi zmanjšali vpliv prostorske avtokorelacije in zagotovili boljšo zanesljivost modelov.

2.2. Podnebni podatki

Za napoved okoljske ustreznosti smo uporabili niz 19 globalnih bioklimatskih slojev (Bioclim), ki so dostopni na spletni strani WorldClim (Hijmans et al, 2005). Ti sloji temeljijo na globalnih podnebnih podatkih o temperaturi in padavinah ter so bili ustvarjeni za opis različnih mesečnih, sezonskih in celoletnih pogojev, v katerih uspevajo rastlinske in živalske vrste.

Na podlagi predhodnih raziskav smo za našo študijo izbrali naslednje ključne spremenljivke:

Bio1 – povprečna letna temperatura,

Bio5 – najvišja temperatura najtoplejšega meseca,

Bio6 – najnižja temperatura najhladnejšega meseca,

Bio7 – letni razpon temperatur,

Bio10 – povprečna temperatura najtoplejšega letnega kvartila,

Bio11 – povprečna temperatura najhladnejšega letnega kvartila,

Bio12 – skupna letna količina padavin,

Bio15 – sezonskost padavin (koeficient variance),

Bio18 – količina padavin v najtoplejšem kvartilu,

Bio19 – količina padavin v najhladnejšem kvartilu.

Za trenutno obdobje smo uporabili bioklimatske sloje za obdobje 1970–2000 v ločljivosti 30 ločnih sekund (~1 km). Pri napovedi potencialne razširjenosti vrst v prihodnosti (2061–2080) smo uporabili sloje v enaki ločljivosti, pri čemer smo upoštevali dva podnebna modela:

- Meteorological Research Institute Earth System Model (MRI-ESM2-0; Yukimoto et al., 2019),
- Met Office Hadley Centre Model (HadGEM3-GC31-LL; Kuhlbrodt et al., 2018)).

Poleg tega smo modelirali vpliv dveh podnebnih scenarijev:

- RCP 4.5, ki predvideva dvig temperature za 1,4 °C in atmosfersko koncentracijo CO_2 nad 500 ppm,
- RCP 8.5, ki predvideva dvig temperature za 2,0 °C in atmosfersko koncentracijo CO_2 nad 550 ppm.

Za vsako proučevano vrsto smo zbrali nabor izbranih bioklimatskih spremenljivk, pri čemer smo upoštevali le tiste, ki med seboj niso bile visoko korelirane (metoda VIF < 2,5).

2.3. Modeliranje

Za modeliranje smo uporabili algoritem Maxent (Phillips et al., 2006), ki napoveduje okoljsko ustreznost v geografskem prostoru na podlagi podatkov o prisotnosti vrst in različnih okoljskih spremenljivk. Ta pristop se je izkazal za zelo učinkovit pri napovedovanju potencialne razširjenosti organizmov in projiciranju rezultatov v spremenjene okoljske razmere. Poleg tega omogoča zanesljive napovedi tudi v primerih, ko je število vhodnih podatkov o razširjenosti omejeno.

Pri modeliranju smo sledili dvema usmeritvama:

2.3.1. Modeliranje okoljske ustreznosti raznolistne mačine in Scopolijevega repnjaka

Ker smo za ti dve vrsti imeli na voljo zadostno količino vhodnih podatkov, smo izračunali ansambel modelov ob upoštevanju vseh okoljskih spremenljivk, ki niso bile visoko korelirane z drugimi (na podlagi analize korelacije). Najprej smo določili optimalne nastavitve modela (*regularization multiplier, feature classes*) z izbiro modela, ki ima najnižjo vrednost Akaikejevega informacijskega kriterija (AIC). Upoštevali smo samo modele z vrednostjo Boyce indeksa nad 0,7. Pri analizi smo uporabili knjižnico ENMeval (Kass et al, 2021) v okolju R Studio (Posit team, 2024)

s programom R (R Core Team, 2024). Modeliranje na podlagi izračunanih nastavitev in projekcijo v nove okoljske razmere smo izvedli s knjižnico programa R Biomod2 (Guéguen et al, 2025). Končni model smo z istim orodjem projicirali na štiri različne scenarije prihodnjih okoljskih razmer. Na podlagi rezultatov smo izračunali konsenzualni model (*consensus*), pri čemer smo povzeli povprečno vrednost vseh štirih projekcij v prihodnost.

2.3.2. Modeliranje okoljske ustreznosti dinarske smiljke

Ker smo imeli za to vrsto manj vhodnih podatkov, smo uporabili drugačen pristop. Na podlagi izbranih bioklimatskih spremenljivk smo izračunali več bivariatnih modelov, pri čemer smo za vsak model uporabili kombinacijo dveh spremenljivk. Končni model je predstavljal ansambel posameznih bivariatnih modelov. Upoštevali smo samo modele z vrednostjo Boyce indeksa nad 0,7. Modeliranje smo izvedli s knjižnico programa R Ecospat (Broennimann et al, 2025). Končni model smo z istim orodjem projicirali na štiri različne scenarije prihodnjih okoljskih razmer. Na podlagi rezultatov smo izračunali konsenzualni model (*consensus*), pri čemer smo povzeli povprečno vrednost vseh štirih projekcij v prihodnost.

Za kartografski prikaz modelov in nadaljnjo prostorsko analizo smo uporabili program ArcGIS 10.7.

3. Rezultati z diskusijo

Po filtriranju smo zadržali podatke o razširjenosti, ki smo jih uporabili pri modeliranju (Preglednica 1). Pri raznolistni mačini smo obdržali približno 12 % zbranih podatkov, medtem ko smo pri Scopolijevem repnjaku in dinarski smiljki ohranili okoli 49 % vhodnih podatkov. Zaradi manjšega

števila razpoložljivih podatkov pri dinarski smiljki smo se odločili za drugačen pristop modeliranja, ki je bolje prilagojen omejenim vhodnim podatkom.

Preglednica 1. število vhodnih podatkov, ter podatkov uporabljenih za modeliranje.

Vrsta	Število vhodnih podatkov	Število podatkov namenjenih modeliranju (< 1km)
Raznolistna mačina *Klasea lycopifolia*	3394	403
Scopolijev repnjak *Arabis scopoliana*	187	91
Dinarska smiljka *Cerastium dinaricum*	51	25

Nastavitve za Maxent modeliranje so bile nastavljene na podlagi vrednosti zapisanih v preglednici 2.

Preglednica 2. Vrednosti nastavitev za Maxent modeliranje

	Raznolistna mačina *Klasea lycopifolia*	Scopolijev repnjak *Arabis scopoliana*
Regularization multiplier	1	0,5
Feature classes	LQHPT	LQ

Pri pripravi modela raznolistne mačine smo uporabili naslednje bioklimatske spremenljivke: Bio5, Bio6, Bio15, Bio18 in Bio19 (Preglednica 3). Največji odstotni prispevek k izgradnji modela je imela Bio19 (količina padavin v najhladnejšem kvartilu), ki je prispevala 60,77 %. Sledili sta Bio18 (količina padavin v najtoplejšem kvartilu) s 13,09 % in Bio15 (sezonskost padavin) z 12,02 %.

Pri modelu Scopolijevega repnjaka je največji prispevek imela spremenljivka Bio7 (letni razpon temperatur), ki je prispevala 42,64 %. Sledili sta Bio19 (količina padavin v najhladnejšem kvartilu) z 23,8 % in Bio10 (povprečna temperatura najtoplejšega letnega kvartila) s 14,14 %.

Za kartografski prikaz potencialne razširjenosti smo uporabili pražne vrednosti, na podlagi katerih smo območja razdelili na okoljsko neustrezna (pod pragovno vrednostjo) in ustrezna (nad pragovno vrednostjo).

Preglednica 3. Pregled rezultatov modela Maxent za raznolistno mačino (*Klasea lycopifolia*) in Scopolijev repnjak (*Arabis scopoliana*). Opis spremenljivk je predstavljen v metodologiji.

Bioclim spremenljivke		Raznolistna mačina *Klasea lycopifolia*	Scopolijev repnjak *Arabis scopoliana*
Bio5	Odstotni prispevek (%)	8,6	
Bio6		5,47	
Bio7			42,64
Bio10			14,14
Bio15		12,02	10,95
Bio18		13,09	8,46
Bio19		60,77	23,80
Pražna vrednost *(Maximum training sensitivity plus specificity Logistic threshold)*		0,247	0,648

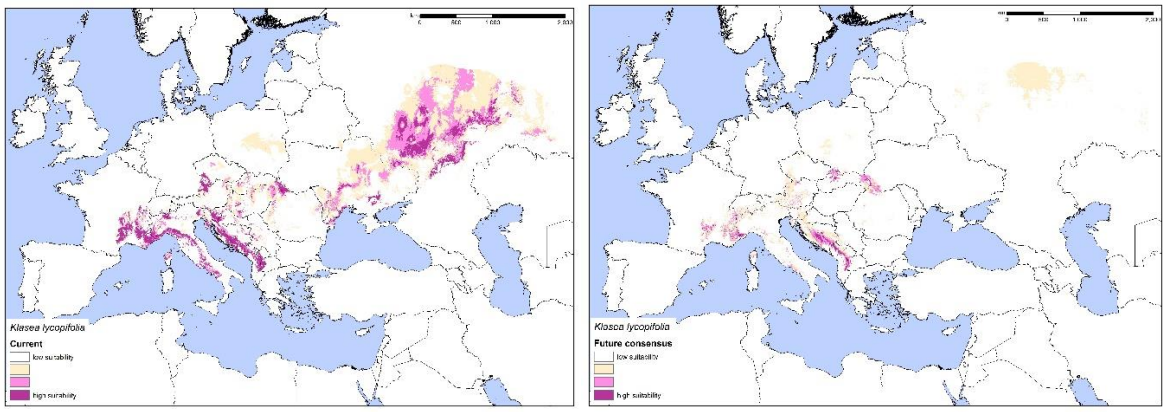
Model za dinarsko smiljko je bil izdelan kot ansambel šestih bivariatnih modelov, pri čemer smo uporabili kombinacije štirih bioklimatskih spremenljivk: Bio7, Bio10, Bio18 in Bio19 (Preglednica 4). Za kartografski prikaz potencialne razširjenosti smo uporabili srednjo vrednost pragovnih vrednosti (Preglednica 4), na podlagi katerih smo območja razdelili na okoljsko neustrezna (pod pragovno vrednostjo) in ustrezna (nad pragovno vrednostjo).

Preglednica 4. Razultati bivariatnih modelov za dinarsko smiljko (*Cerasium dinaricum*).

Bivariatna kombinacija spremenljivk		Odstotni prispevek (%)		Pražna vrednost *(Maximum training sensitivity plus specificity Logistic threshold)*
Bio10	Bio7	42,28	56,72	0,5
Bio18	Bio7	30,83	69,17	0,558
Bio19	Bio7	58,39	41,61	0,667
Bio10	Bio18	74,98	25,02	0,5
Bio10	Bio19	53,14	46,86	0,666
Bio18	Bio19	21,67	78,33	0,5

3.1. Model okoljske ustreznosti raznolistne mačine (*Klasea lycopifolia*)

Od vseh treh proučevanih vrst ima raznolistna mačina največji areal razširjenosti. Da bi v analizi zajeli celotno ekološko nišo, smo poleg podatkov za širše projektno območje zbrali tudi podatke iz baze GBIF ter tako pokrili celoten areal razširjenosti, ki sega od zahodne Rusije prek jugovzhodne Evrope do zahodnega roba Alp in osrednjega dela Apeninskega polotoka. Slika 1A prikazuje rezultat modela za sedanjost, ki napoveduje bistveno večje območje okoljske ustreznosti, kot ga vrsta dejansko zaseda. Za natančnejšo oceno dejanske razširjenosti vrste bi bilo treba upoštevati dodatne dejavnike, kot so habitatni tipi in raba tal, ki jih v ta model nismo vključili. Konsenzualni model za prihodnost napoveduje krčenje območja okoljske ustreznosti (slika 1B). Presenetljivo je, da je najobsežnejše krčenje predvideno za vzhodni del areala, ki je do zdaj veljal za osrednje območje razširjenosti. Krčenje območja ustreznosti na programskem območju Interreg bo v primerjavi s celotnim arealom nekoliko manjše. Vsi modeli in grafična analiza so predstavljeni v slikovni prilogi na strani 13 tega poročila.



Slika 1 A in B. Rezultati modelov okoljske ustreznosti za raznolistno mačino (*Klasea lycopifolia*) prikazujejo njeno celotno območje razširjenosti. Slika 1A (levo) predstavlja okoljsko ustreznost na podlagi trenutnih okoljskih razmer, medtem ko slika 1B (desno) prikazuje konsenzualni model za projekcije v prihodnosti.

3.2. Model okoljske ustreznosti Scopolijevega repnjaka (*Arabis scopoliana*)

Projekcije modelov okoljskih razmer za prihodnost kažejo, da se bo območje okoljske ustreznosti za Scopolijev repnjak drastično zmanjšalo. Poleg jugovzhodnih Alp, kjer ta vrsta ni poznana, večina modelov za prihodnost kot okoljsko ustrezno območje predvideva le severni Velebit. Znotraj programskega območja kaže, da vrsta ne bo imela možnosti za preživetje. Ker ti modeli upoštevajo razmere na nekoliko bolj grobi skali, bodo ključni tudi rezultati analiz mrazišč, ki jih izvajamo v okviru projekta transPlant. Ti modeli nam bodo na bolj natančni prostorski resoluciji pokazali, ali bo vrsta imela možnosti za preživetje znotraj projektnega območja. Rezultati kažejo, da varstvo in situ ne bo zadostovalo za dolgoročno ohranitev vrste. Pomembni so tudi ex situ ukrepi, kot so shranjevanje semen in genetskega materiala v ustrezno vzpostavljenih in vzdrževanih zbirkah. Zaradi pomanjkanja primernih rastišč v prihodnosti bodo varstveni ukrepi, kot so preselitve, nujno potrebni za ohranitev nekaterih najbolj ogroženih rastlinskih vrst. Vsi modeli in grafična analiza so predstavljeni v slikovni prilogi na strani 14 tega poročila.

3.3. Model okoljske ustreznosti dinarske smiljke (*Cerastium dinaricum*)

Rezultati za dinarsko smiljko kažejo na še nekoliko večje krčenje ugodnih okoljskih razmer v prihodnosti v primerjavi s Scopolijevim repnjakom, s katerim si delita podobno življenjsko okolje. Eden od modelov (MRI245) predvideva, da se bo vrsta ohranila na območju Snežnika, medtem ko ostali modeli tega ne predvidevajo. Napovedujejo pa ohranitev ugodnih razmer v jugovzhodnih Alpah, kjer vrsta ne uspeva. Podobno kot za Scopolijev repnjak bodo tudi za dinarsko smiljko ključni rezultati analiz razmer v mraziščnih vrtačah, kjer bi se lahko dolgoročno ohranile ugodne razmere za nekatere rastlinske vrste, za katere modeli prihodnosti ne kažejo obetavnih napovedi. Tudi v tem primeru bodo potrebni alternativni pristopi k obstoječim varstvenim strategijam. Program upravljanja Nature 2000 ne ponuja rešitev za scenarije, ki jih napoveduje ta študija. Zato bo potreben temeljit razmislek o uporabi alternativnih pristopov, ki jih trenutna varstvena politika ne predvideva ali ne podpira. Vsi modeli in grafična analiza so predstavljeni v slikovni prilogi na strani 15 tega poročila.

4. VIRI

Broennimann O, Di Cola V, Guisan A (2025). _ecospat: Spatial Ecology Miscellaneous Methods_. R package version 4.1.2, https://CRAN.R-project.org/package=ecospat

Glasnović P, Fišer Ž, Jančič M, Balant M, Surina B (2023). Areography, environmental heterogeneity and spatial models explain patterns of past and present diversity in *Edraianthus* (Campanulaceae). *Botanical Journal of the Linnean Society*, 202 (2), 215-232

Guéguen M, Blancheteau H, Thuiller W (2025). biomod2: Ensemble Platform for Species Distribution Modeling. R package version 4.3-2-2, https://biomodhub.github.io/biomod2/

Hijmans R J, Cameron SE, Parra JL, Jones PG, Jarvis A (2005). WORLDCLIM - a set of global climate layers (climate grids). *Int. J. Climatol*. 25.

Kass J, Muscarella R, Galante P, Bohl C, Buitrago-Pinilla G, Boria R, Soley-Guardia M, Anderson R (2021). “ENMeval 2.0: Redesigned for customizable and reproducible modeling of species' niches and distributions.” *Methods in Ecology and Evolution*, **12**(9), 1602-1608.

Kuhlbrodt T, Jones CG, Sellar A, O'Connor F, Mulcahy J, Stringer M, Hill R, Rumbold H, Walton J, Wood RA, Roberts M, Hardiman S, Vidale PL, Grosvenor D, Williams KD (2018) The low-resolution version of HadGEM3 GC3.1: Development and evaluation for global climate *Journal of Advances in Modeling Earth Systems 10*(10) 2865–2888

Li J, Huanhuan L, Yangxue W, Lingda Z, Huang X (2019) Spatial patterns and determinants of the diversity of hemipteran insects in the Qinghai-Tibetan Plateau. *Frontiers in Ecology and Evolution* 7: 1–10.

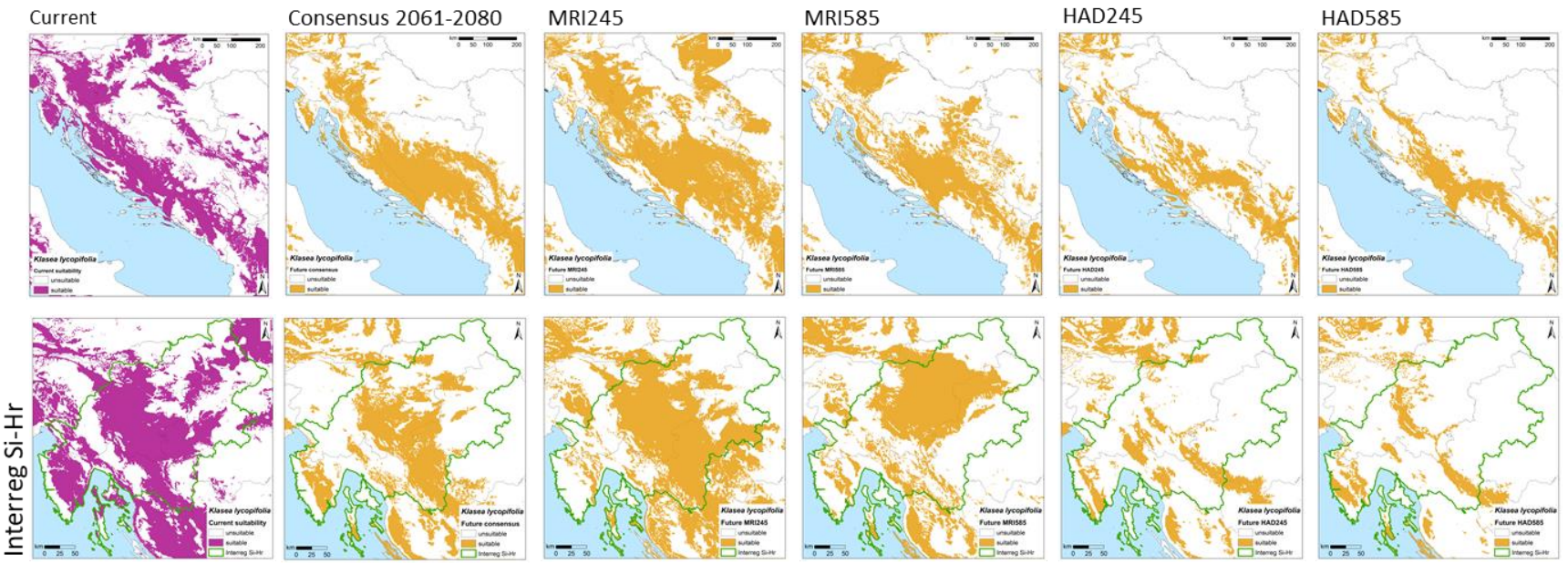
Phillips SJ, Anderson RP Schapire RE (2006) Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecological Modelling 190:231-259.

Posit team (2024). RStudio: Integrated Development Environment for R. Posit Software, PBC, Boston, MA. URL http://www.posit.co/

R Core Team (2024). _R: A Language and Environment for Statistical Computing_. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>

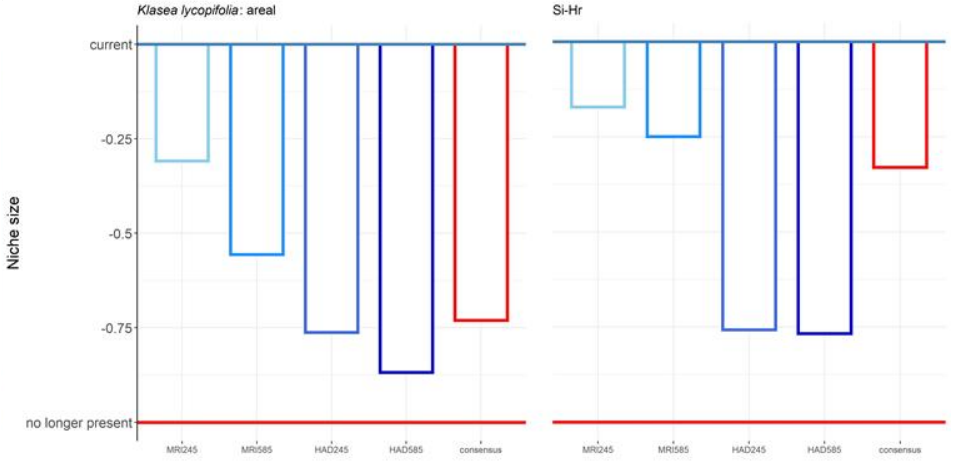
Yukimoto S, Kawai H, Koshiro T, Oshima N, Yoshida K, Urakawa S, Tsujino H, Deushi M, Tanaka T, Hosaka M, Yabu S, Yoshimura H, Shindo E, Mizuta R, Obata A, Adachi Y, Ishii M (2019). The Meteorological Research Institute Earth System Model Version 2.0, MRI-ESM2.0: Description and Basic Evaluation of the Physical Component. Journal of the Meteorological Society of Japan. 97. 10.2151/jmsj.2019-051.

Klasea lycopifolia

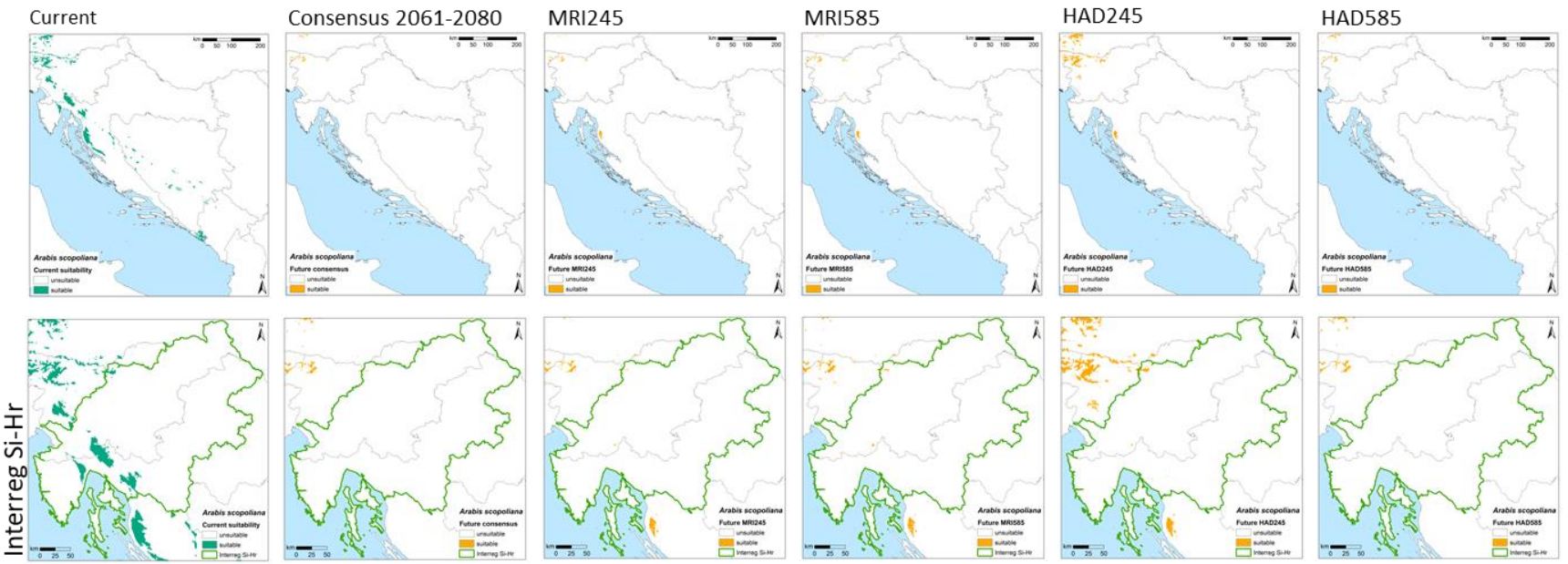


Interreg
Slovenija – Hrvatska
transPlant



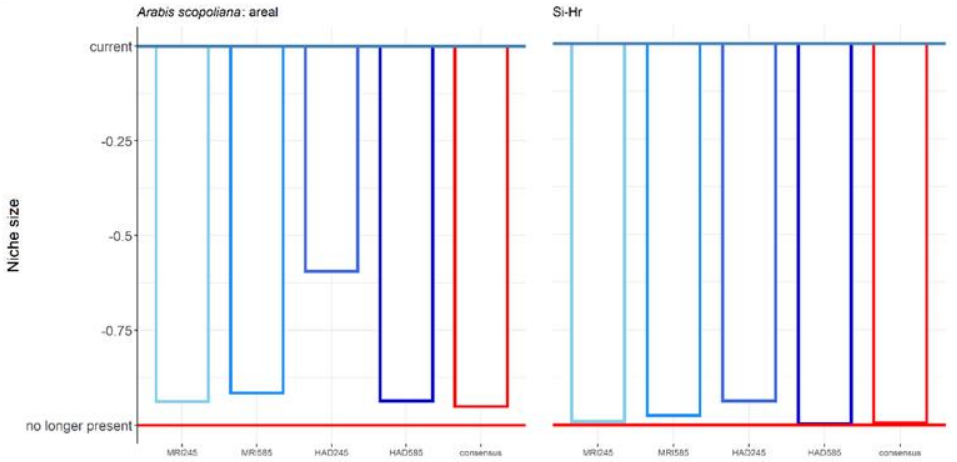


Arabis scopoliana

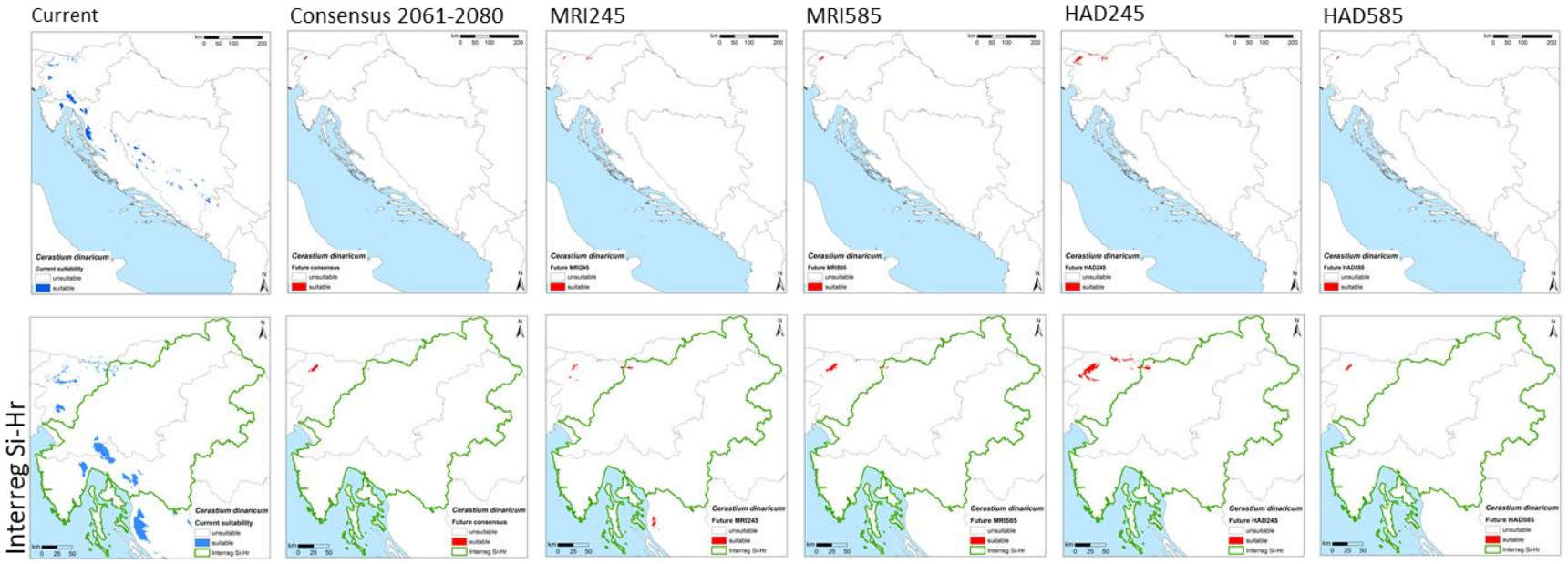


Interreg
Slovenija – Hrvatska
transPlant



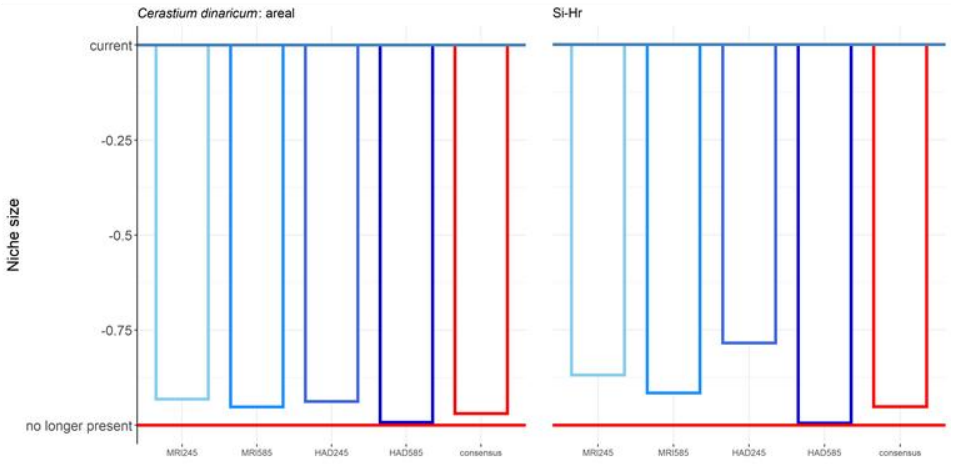


Cerastium dinaricum



Interreg
Slovenija – Hrvatska
transPlant





D. 1.4.2 Studija Klimatske promjene, vegetacija i rasprostranjenost ciljnih vrsta projekta u budućnosti

Projekt	transPlant – Integrativna prekogranična zaštita Natura 2000 biljnih vrsta i staništa
Radni paket	Radni paket 1; Aktivnost 1.4 - Rasprostranjenost ciljnih N2000 vrsta projekta na prekograničnom programskom području u budućnosti
Odgovoran partner	UP - Univerza na Primorskem
Vodeći partner	PMR – Prirodoslovni Muzej Rijeka
Autori	dr.sc. Anka Kuhelj (UP - Univerza na Primorskem) Špela Čonč, mag. geo. (ZRC SAZU) dr.sc. Peter Glasnović (UP - Univerza na Primorskem) dr.sc. Boštjan Surina (PMR - Prirodoslovni Muzej Rijeka)
Prijevod	dr. sc. Peter Glasnović (UP - Univerza na Primorskem) dr.sc. Boštjan Surina (PMR - Prirodoslovni Muzej Rijeka)
Unutarnja recenzija	dr.sc. Željka Modrić Surina (PMR - Prirodoslovni Muzej Rijeka)

1. Polazna točka

U sklopu aktivnosti 1.4 „Rasprostranjenost ciljnih N2000 vrsta projekta na prekograničnom programskom području u budućnosti “, izradili smo studiju o potencijalnoj rasprostranjenosti triju ciljnih vrsta projekta – razgranjeni srpac (*Klasea lycopifolia*), Scopolijeva gušarka (*Arabis scopoliana*) i dinarskog rožca (*Cerastium dinaricum*) – u narednim desetljećima. Istraživanje se temelji na različitim scenarijima globalnih klimatskih promjena i analizira njihov utjecaj na rasprostranjenost navedenih vrsta. Svrha studije bila je utvrditi kako klimatske promjene mogu utjecati na njihovu rasprostranjenost, s obzirom na to da u sklopu projekta izrađujemo smjernice za njihovu prekograničnu zaštitu. Istraživanje je uključivalo prikupljanje podataka o trenutnoj rasprostranjenosti vrsta te okolišnim varijablama koje opisuju postojeće klimatske uvjete. Ti su podaci potom uspoređeni s klimatskim varijablama iz modela za razdoblje 2061.–2080. Za potrebe modeliranja koristili smo napredni algoritam koji se često primjenjuje za predviđanje okolišne prikladnosti područja na temelju dostupnih ulaznih podataka.

2. Metodologija

2.1. Podaci o rasprostranjenosti

Podaci o rasprostranjenosti ciljnih vrsta prikupljeni su putem terenskih istraživanja, herbarskih zbirki, stručne literature i javno dostupnih baza podataka (primj. GBIF – Global Biodiversity Information Facility). Svi prikupljeni podaci georeferencirani su u koordinatnom sustavu WGS84, koristeći GPS uređaje i mrežne GIS aplikacije. Zbog zahtjeva modeliranja, podaci su prorijeđeni na minimalnu međusobnu udaljenost od 1 km kako bi se smanjio utjecaj prostorne autokorelacije te povećala pouzdanost modela.

2.2. Podaci o klimi

Za predviđanje okolišne prikladnosti koristili smo skup od 19 globalnih bioklimatskih slojeva (Bioclim), dostupnih na mrežnoj stranici WorldClim (Hijmans et al., 2005). Ovi slojevi temelje se na globalnim podacima o temperaturi i oborinama, a razvijeni su kako bi opisali različite mjesečne, sezonske i godišnje klimatske uvjete u kojima biljne i životinjske vrste uspijevaju.

Na temelju prethodnih istraživanja (Li et al., 2019, Glasnović et al., 2023), za potrebe ove studije odabrali smo sljedeće ključne varijable:

Bio1 – prosječna godišnja temperatura

Bio5 – najveća temperatura najtoplijeg mjeseca

Bio6 – najmanja temperatura najhladnijeg mjeseca

Bio7 – godišnji temperaturni raspon

Bio10 – prosječna temperatura najtoplijeg kvartila

Bio11 – prosječna temperatura najhladnijeg kvartila

Bio12 – ukupna godišnja količina oborina

Bio15 – sezonalnost oborina (koeficijent varijance)

Bio18 – količina oborina u najtoplijem kvartilu

Bio19 – količina oborina u najhladnijem kvartilu

Za sadašnje razdoblje koristili smo bioklimatske slojeve koji obuhvaćaju razdoblje 1970. – 2000., u prostornoj rezoluciji od 30 lučnih sekundi (približno 1 km). Kod modeliranja potencijalne

buduće rasprostranjenosti ciljnih vrsta za razdoblje 2061. – 2080., koristili smo bioklimatske slojeve iste rezolucije. U analizu su uključena dva klimatska modela:

- Meteorological Research Institute Earth System Model (MRI-ESM2-0; Yukimoto et al., 2019),
- Met Office Hadley Centre Model (HadGEM3-GC31-LL; Kuhlbrodt et al., 2018)).

Osim toga, modelirali smo utjecaj dva klimatska scenarija:

- RCP 4.5, koji predviđa porast temperature od 1,4 °C i koncentraciju CO_2 u atmosferi iznad 500 ppm,
- RCP 8.5, koji predviđa porast temperature od 2,0 °C i koncentraciju CO_2 u atmosferi iznad 550 ppm.

Za svaku proučavanu vrstu prikupili smo skup odabranih bioklimatskih varijabli, pri čemu smo uključili samo one koje međusobno nisu pokazivale visoku korelaciju. Za provjeru multikolinearnosti korištena je metoda faktora inflacije varijance (VIF), pri čemu je prag bio postavljen na < 2,5.

2.3. Modeliranje

Za modeliranje smo koristili Maxent algoritam (Maximum Entropy Modeling; Phillips et al., 2006), koji predviđa okolišno prikladnost unutar geografskog prostora na temelju podataka o prisutnosti vrsta i odgovarajućih okolišnih varijabli.

Ovaj se pristup pokazao iznimno učinkovitim u predviđanju potencijalne rasprostranjenosti organizama te u projiciranju tih rezultata u izmijenjene okolišne uvjete. Osim toga, Maxent omogućuje pouzdana predviđanja čak i u slučajevima kada je broj podataka o prevalenciji ograničen.

U modeliranju smo slijedili dva smjera:

2.3.1. Modeliranje okolišnih prikladnosti razgranjenog srpca i Scopolijeve gušarke

Budući da smo za ove dvije vrste imali dovoljno dostupnih ulaznih podataka, izradili smo skup modela uzimajući u obzir sve okolišne varijable koje nisu bile međusobno visoko korelirane. U prvom koraku odredili smo optimalne postavke modela (*regularization multiplier, feature classes*) odabirom modela s najnižom vrijednošću Akaikeovog informacijskog kriterija (AIC). Uzeli smo u obzir samo modele s vrijednošću Boyceovog indeksa iznad 0,7. Analiza je provedena pomoću R biblioteke ENMeval (Kass et al., 2021) u razvojnom okruženju RStudio (Posit Team, 2024), koristeći programski jezik R (R Core Team, 2024). Modeliranje temeljeno na optimalnim parametrima te projekcija na buduće okolišne uvjete provedeni su pomoću knjižnice Biomod2 (Guéguen et al., 2025). Konačni model projiciran je na četiri scenarija budućih klimatskih uvjeta koristeći isti alat. Na temelju dobivenih rezultata izrađen je konsenzusni model (*consensus*), koji predstavlja prosječnu vrijednost svih četiriju projekcija.

2.3.2. Modeliranje okolišnih prikladnosti dinarskog rožca

Budući da smo za ovu vrstu imali manji broj ulaznih podataka, primijenili smo drugačiji pristup modeliranju. Na temelju prethodno odabranih bioklimatskih varijabli izrađeni su bivarijatni modeli, svaki temeljen na kombinaciji dviju varijabli. Konačni model predstavlja skup pojedinačnih bivarijatnih modela, koji zajedno opisuju okolišne prikladnost vrste. Uzeli smo u obzir samo modele s vrijednošću Boyceovog indeksa iznad 0,7. Modeliranje je provedeno pomoću R biblioteke Ecospat (Broennimann et al., 2025), a konačni model projiciran je na četiri scenarija budućih okolišnih uvjeta koristeći isti alat. Na temelju rezultata izrađen je konsenzusni model, koji prikazuje prosječnu vrijednost svih četiriju projekcija.

Za kartografski prikaz modela i daljnju prostornu analizu korišten je softver ArcGIS. 10.7.

3. Rezultati sa diskusijom

Nakon filtriranja upotrijebili smo skup podataka o prevalenciji koji je korišten u modeliranju (Tablica 1). Za razgranjeni srpac smo upotrijebili približno 12 % prikupljenih podataka, dok je za Scopolijevu gušarku i dinarski rožac u model uključeno oko 49 % ulaznih zapisa. Zbog ograničenog broja dostupnih podataka za dinarski rožac, odlučili smo primijeniti alternativni pristup modeliranju, bolje prilagođen situacijama s malim uzorkom i smanjenom razinom informacija.

Tablica 1. broj ulaznih podataka i podataka korištenih za modeliranje.

Vrsta	Broj ulaznih podataka	Broj podataka korištenih za modeliranje (< 1km)
Razgranjeni srpac *Klasea lycopifolia*	3394	403
Scopolijeva gušarka *Arabis scopoliana*	187	91
Dinarski rožac *Cerastium dinaricum*	51	25

Postavke za Maxent modeliranje postavljene su na temelju vrijednosti zabilježenih u tablici 2.

Tablica 2. Postavke za Maxent modeliranje

	Razgranjeni srpac *Klasea lycopifolia*	Scopolijeva gušarka *Arabis scopoliana*
Regularization multiplier	1	0,5
Feature classes	LQHPT	LQ

U izradi modela za razgranjeni srpac korištene su sljedeće bioklimatske varijable: Bio5, Bio6, Bio15, Bio18 i Bio19 (Tablica 3). Najveći doprinos modelu ostvarila je varijabla Bio19 (količina oborina u najhladnijem kvartilu), s udjelom od 60,77 %. Slijedile su varijable Bio18 (količina oborina u najtoplijem kvartilu) s 13,09 %, te Bio15 (sezonalnost oborina) s 12,02 %. U modelu za Scopolijevu gušarku najveći doprinos modelu ostvarila je varijabla Bio7 (godišnji temperaturni

raspon), s udjelom od 42,64 %. Slijede varijabla Bio19 (količina oborina u najhladnijem kvartilu) s 23,80 %, te Bio10 (prosječna temperatura najtoplijeg godišnjeg kvartila) s 14,14 %. Za kartografski prikaz potencijalne rasprostranjenosti koristili smo granične vrijednosti prikladnosti, na temelju kojih je prostor podijeljen na dvije kategorije: okolišno neprikladna područja (vrijednosti ispod graničnog praga) i okolišno pogodna područja (vrijednosti iznad graničnog praga).

Tablica 3. Pregled rezultata Maxent modela za razgranjeni srpac (*Klasea lycopifolia*) i Scopoliavu gušarku (*Arabis scopoliana*). Opis varijabli prikazan je u metodologiji.

Bioclim varijable		Razgranjeni srpac *Klasea lycopifolia*	Scopolijeva gušarka *Arabis scopoliana*
Bio5	Postotni doprinos (%)	8,6	
Bio6		5,47	
Bio7			42,64
Bio10			14,14
Bio15		12,02	10,95
Bio18		13,09	8,46
Bio19		60,77	23,80
Granična vrijednost *(Maximum training sensitivity plus specificity Logistic threshold)*		0,247	0,648

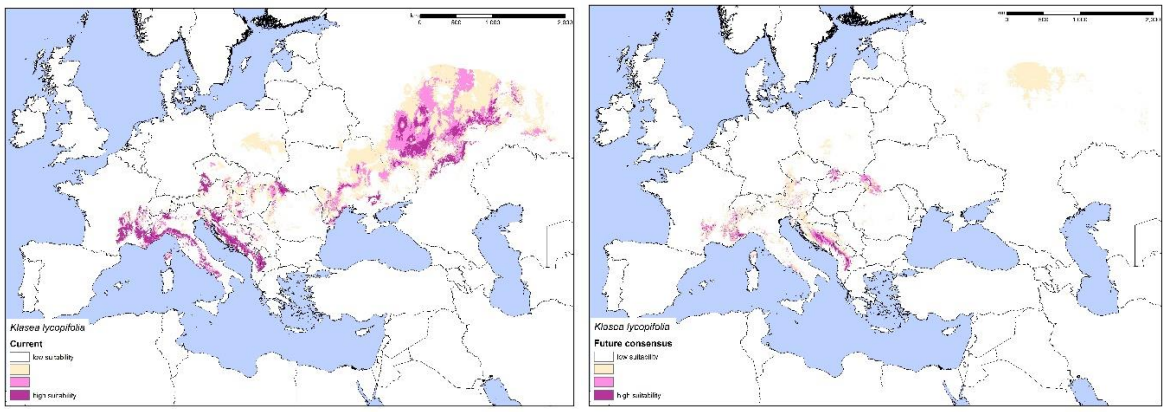
Model za dinarski rožac konstruiran je kao skup od šest bivarijatnih modela, temeljenih na različitim kombinacijama četiriju bioklimatskih varijabli: Bio7, Bio10, Bio18 i Bio19 (Tablica 4). Za kartografski prikaz potencijalne rasprostranjenosti korištena je srednja vrijednost graničnih pragova iz svih modela (Tablica 4). Za kartografski prikaz koristili smo isti pristup kao i za gornje dvije vrste.

Tablica 4. Razultati bivariatnih modela za dinarski rožac (*Cerasium dinaricum*).

Bivariatna kombinacija varijabla		Postotni doprinos (%)		Granična vrijednost *(Maximum training sensitivity plus specificity Logistic threshold)*
Bio10	Bio7	42,28	56,72	0,5
Bio18	Bio7	30,83	69,17	0,558
Bio19	Bio7	58,39	41,61	0,667
Bio10	Bio18	74,98	25,02	0,5
Bio10	Bio19	53,14	46,86	0,666
Bio18	Bio19	21,67	78,33	0,5

3.1. Model okolišne prikladnosti razgranjenog srpca (*Klasea lycopifolia*)

Od svih triju proučavanih vrsta, razgranjeni srpac ima najveće područje rasprostranjenosti. Kako bismo obuhvatili cjelokupnu okolišnu nišu vrste, osim podataka za šire projektno područje, prikupili smo i podatke iz GBIF baze podataka, čime smo pokrili cijelo područje njezine rasprostranjenosti koje se proteže od zapadne Rusije, preko jugoistočne Europe, do zapadnog ruba Alpa i središnjeg dijela Apeninskog poluotoka. Slika 1A prikazuje rezultat modela za sadašnjost, koji predviđa znatno veće područje okolišne prikladnosti nego što vrsta stvarno zauzima. Za točniju procjenu stvarne rasprostranjenosti vrste bilo bi potrebno uzeti u obzir dodatne čimbenike, poput tipova staništa i korištenja zemljišta, koje nismo uključili u ovaj model. Konsenzusni model za budućnost (Slika 1B) predviđa smanjenje okolišno prihvatljivog područja. Iznenađujuće, najopsežnije smanjenje predviđa se za istočni dio areala, koji se do sada smatrao središnjim dijelom distribucije. Smanjenje područja prihvatljivosti u projektnom programskom području bit će nešto manje u odnosu na cijelo područje. Svi modeli i grafička analiza prikazani su u slikovnom prilogu na stranici 13 ovog izvješća.



Slika 1 A in B. Rezultati modela okolišne prikladnosti za razgranjeni srpac (*Klasea lycopifolia*) pokazuju njezin cjelokupni areal rasprostranjenosti. Slika 1A (lijevo) predstavlja okolišno prikladnost temeljenu na trenutnim uvjetima okoline, dok Slika 1B (desno) prikazuje konsenzusni model za buduće projekcije.

3.2. Model okolišne prikladnosti Scopolijeve gušarke (*Arabis scopoliana*)

Projekcije okolišnih modela za buduće uvjete pokazuju da će se područje okolišne prikladnosti za Scopolijevu gušarku drastično smanjiti. Osim jugoistočnih Alpa, gdje ova vrsta nije poznata, većina modela predviđa da će sjeverni Velebit biti jedino okolišno prihvatljivo područje u budućnosti. Čini se da unutar programskog područja vrsta neće imati mogučnosti za opstanak. Budući da ovi modeli koriste grublju prostornu skalu, rezultati analiza hladne ponikve, koje se provode u sklopu projekta transPlant, bit će ključni za precizniju procjenu. Ovi modeli omogućit će nam da u velikoj prostornoj rezoluciji odredimo hoće li vrsta imati mogučnosti za opstanak unutar projektnog područja. Rezultati sugeriraju da *in situ* zaštita neće biti dovoljna za dugoročno očuvanje vrste. *Ex situ* mjere, poput skladištenja sjemena i genetskog materijala u odgovarajućim zbirkama, također su od esencijalne važnosti. Zbog očekivanog nedostatka odgovarajućih staništa u budućnosti, mjere očuvanja poput premještanja (raznih tipova translokacija) bit će ključne za

očuvanje najugroženijih biljnih vrsta. Svi modeli i grafička analiza prikazani su u slikovnom prilogu na stranici 14 ovog izvješća.

3.3. Model okolišne prikladnosti dinarskog rožca (*Cerastium dinaricum*)

Rezultati za dinarski rožac ukazuju na veće smanjenje povoljnih okolišnih uvjeta u budućnosti u odnosu na Scopolijevu gušarku, s kojim dijeli slično stanište. Jedan od modela (MRI245) predviđa da će se vrsta zadržati na području Snežnika, dok drugi modeli to ne predviđaju. Ipak, svi modeli predviđaju da će se povoljni uvjeti i dalje održavati u jugoistočnim Alpama, gdje vrsta trenutno ne uspijeva. Slično kao i za Scopolijevu gušarku, ključni rezultati za dinarski rožac bit će rezultati analiza stanja u hladnim ponikvama, koje bi dugoročno mogle pružiti povoljne uvjete za neke biljne vrste, za koje modeli za budućnost ne predviđaju obećavajuće rezultate. Čak i u ovom slučaju, bit će potrebni alternativni pristupi postojećim strategijama očuvanja. Program upravljanja Natura 2000 ne nudi rješenja za scenarije predviđene ovom studijom. Stoga će biti nužno temeljito razmotriti korištenje alternativnih pristupa koji nisu predviđeni niti podržani trenutnim politikama očuvanja. Svi modeli i grafička analiza prikazani su u slikovnom prilogu na stranici 15 ovog izvješća.

4. LITERATURA

Broennimann O, Di Cola V, Guisan A (2025). _ecospat: Spatial Ecology Miscellaneous Methods_. R package version 4.1.2, https://CRAN.R-project.org/package=ecospat

Glasnović P, Fišer Ž, Jančič M, Balant M, Surina B (2023). Areography, environmental heterogeneity and spatial models explain patterns of past and present diversity in *Edraianthus* (Campanulaceae). *Botanical Journal of the Linnean Society*, 202 (2), 215-232

Guéguen M, Blancheteau H, Thuiller W (2025). biomod2: Ensemble Platform for Species Distribution Modeling. R package version 4.3-2-2, https://biomodhub.github.io/biomod2/

Hijmans R J, Cameron SE, Parra JL, Jones PG, Jarvis A (2005). WORLDCLIM - a set of global climate layers (climate grids). *Int. J. Climatol*. 25.

Kass J, Muscarella R, Galante P, Bohl C, Buitrago-Pinilla G, Boria R, Soley-Guardia M, Anderson R (2021). "ENMeval 2.0: Redesigned for customizable and reproducible modeling of species' niches and distributions." *Methods in Ecology and Evolution*, **12**(9), 1602-1608.

Kuhlbrodt T, Jones CG, Sellar A, O'Connor F, Mulcahy J, Stringer M, Hill R, Rumbold H, Walton J, Wood RA, Roberts M, Hardiman S, Vidale PL, Grosvenor D, Williams KD (2018) The low-resolution version of HadGEM3 GC3.1: Development and evaluation for global climate *Journal of Advances in Modeling Earth Systems 10*(10) 2865–2888

Li J, Huanhuan L, Yangxue W, Lingda Z, Huang X (2019) Spatial patterns and determinants of the diversity of hemipteran insects in the Qinghai-Tibetan Plateau. *Frontiers in Ecology and Evolution* 7: 1–10.

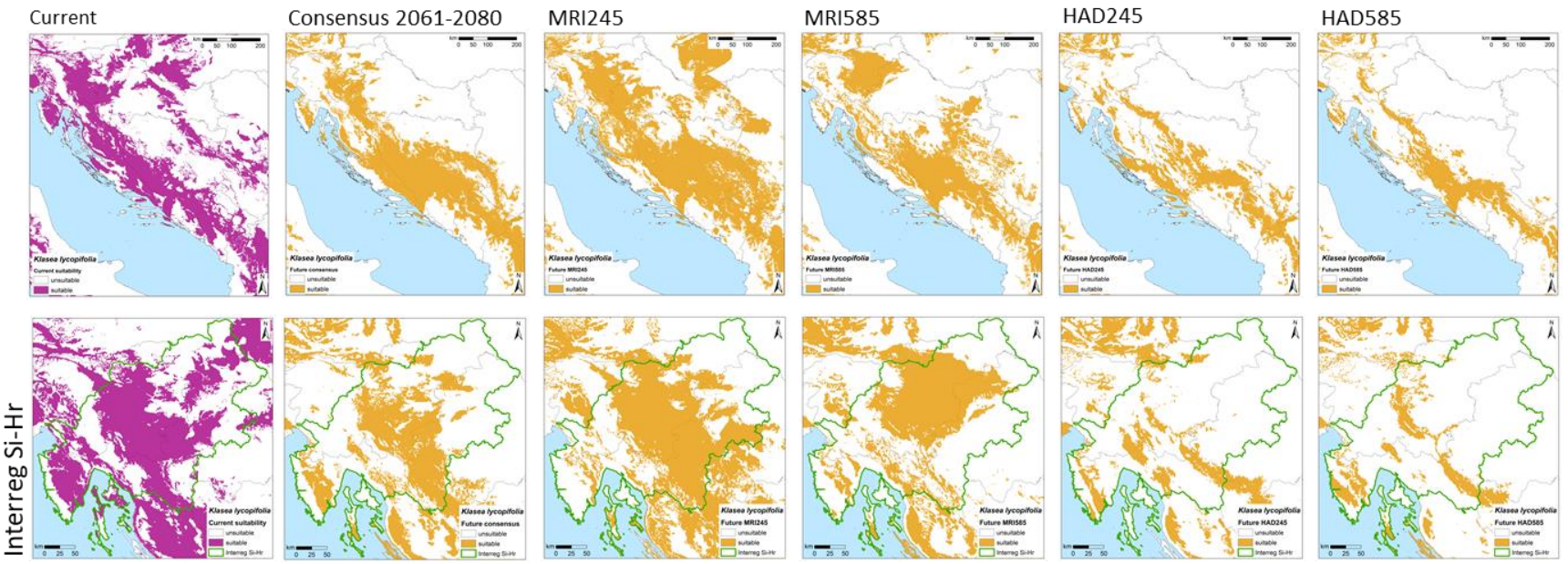
Phillips SJ, Anderson RP Schapire RE (2006) Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecological Modelling 190:231-259.

Posit team (2024). RStudio: Integrated Development Environment for R. Posit Software, PBC, Boston, MA. URL http://www.posit.co/

R Core Team (2024). _R: A Language and Environment for Statistical Computing_. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>

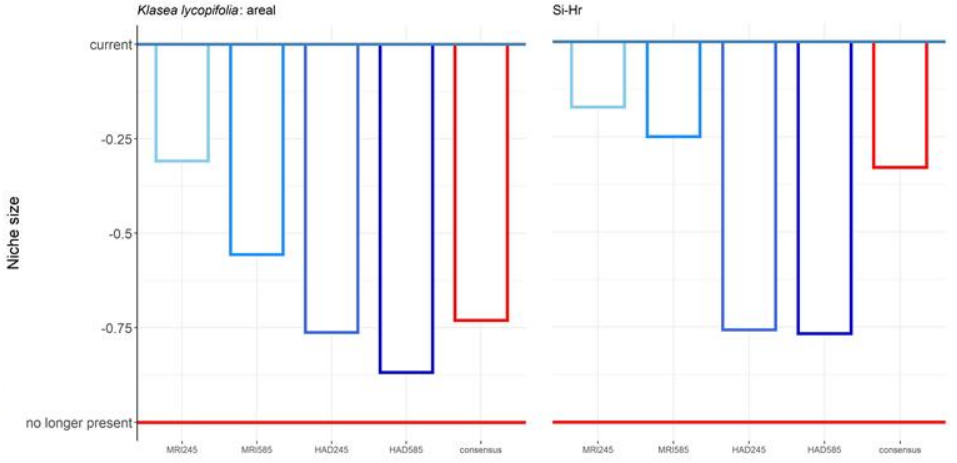
Yukimoto S, Kawai H, Koshiro T, Oshima N, Yoshida K, Urakawa S, Tsujino H, Deushi M, Tanaka T, Hosaka M, Yabu S, Yoshimura H, Shindo E, Mizuta R, Obata A, Adachi Y, Ishii M (2019). The Meteorological Research Institute Earth System Model Version 2.0, MRI-ESM2.0: Description and Basic Evaluation of the Physical Component. Journal of the Meteorological Society of Japan. 97. 10.2151/jmsj.2019-051.

Klasea lycopifolia

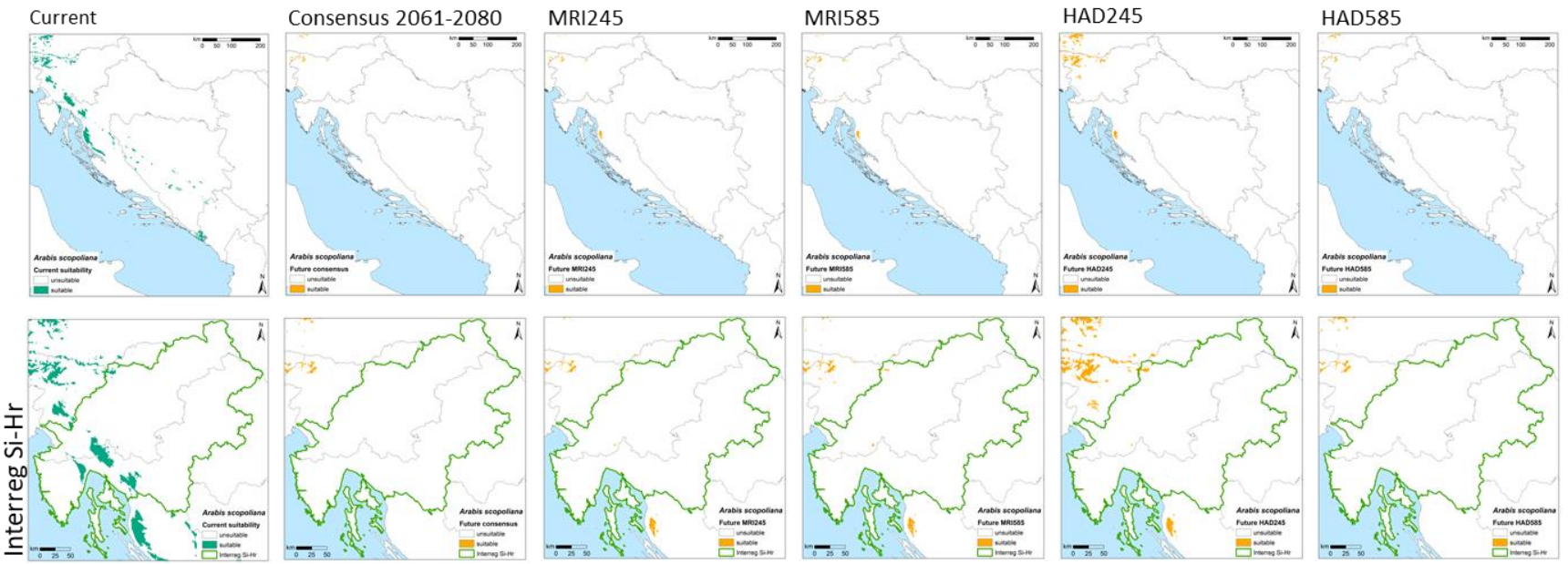


Interreg
Slovenija – Hrvatska
transPlant



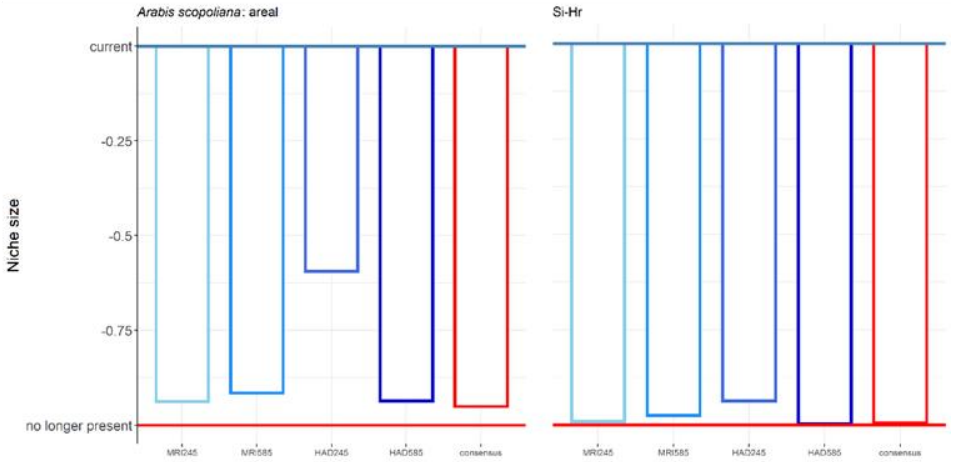


Arabis scopoliana

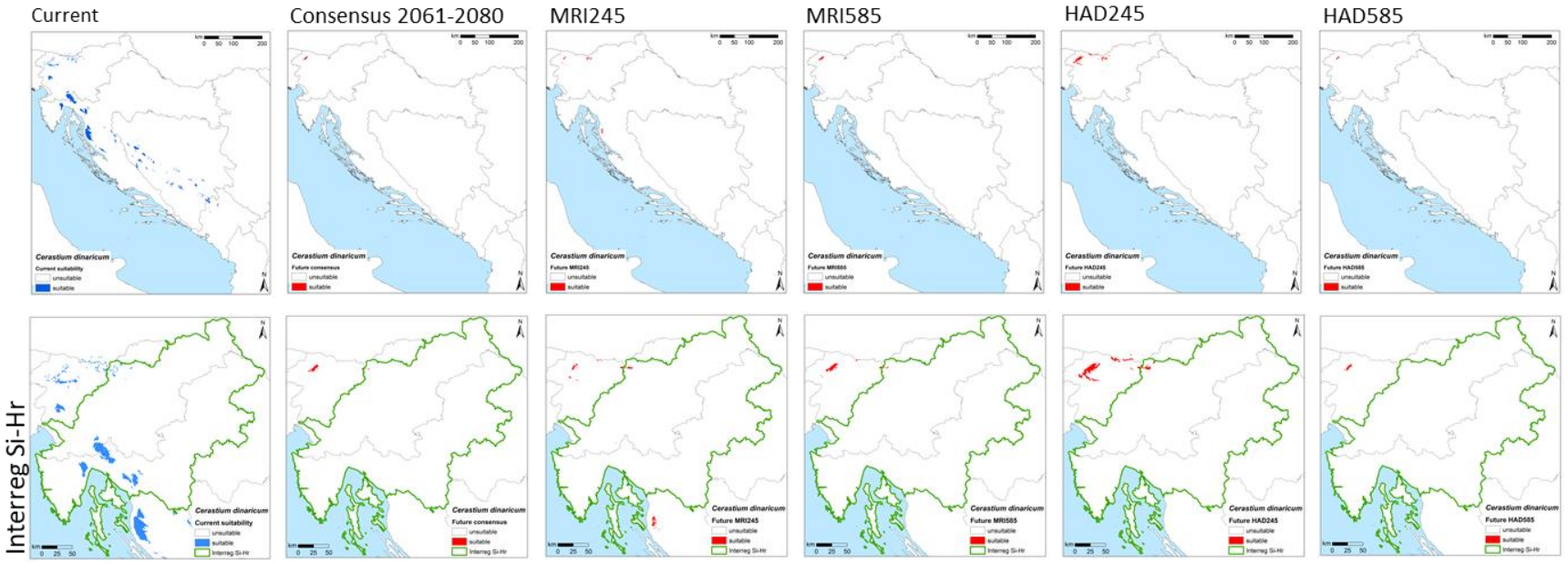


Interreg
Slovenija – Hrvatska
transPlant





Cerastium dinaricum



Interreg
Slovenija – Hrvatska
transPlant



