

Prejeto/
Received:
31. maj 2024
Popravljeno/
Revised:
5. jun. 2024
Sprejeto/
Accepted:
14. sep. 2024
Objavljeno/
Published:
2. jan. 2025

Primerjalna analiza jakosti in smeri podnebnih sprememb v Evropi od pliocena do antropocena

Danijel Ivajnsič^{1,2} 
dani.ivajnsic@um.si

Daša Donša^{2,3} 
dasa.donsa@kis.si

¹Univerza v Mariboru, Filozofska fakulteta, Oddelek za geografijo; Maribor, Slovenija

²Univerza v Mariboru, Fakulteta za naravoslovje in matematiko, Oddelek za biologijo; Maribor Slovenija

³Kmetijski inštitut Slovenije, Oddelek za varstvo rastlin; Ljubljana, Slovenija

Izvleček

Razumevanje paleo-podnebnih sprememb na Zemlji je ključno za pripravo globalnih podnebnih modelov, ki napovedujejo podnebje v 21. stoletju, hkrati pa te spremembe predstavljajo pomembno gonilo recentnih vzorcev biodiverzitete. V prispevku z vektorsko analizo (CVA) obravnavamo spremembe povprečne letne temperature zraka in količine padavin v Evropi na podlagi baz PaleoClim in CHELSA, od pliocena do konca 21. stoletja. Osredotočamo se na regionalne podobnosti in razlike v jakosti in smeri sprememb. Rezultati poudarjajo naravno dinamiko podnebja in služijo kot umeritev za napovedi prihodnjih sprememb, ki so osnova za trenutne in prihodnje prilagoditvene strategije v Evropi.

Ključne besede

povprečna letna višina padavin, povprečna letna temperatura zraka, Change Vector Analysis (CVA), Non-metric Multi-Dimensional Scaling (NMDS), Paleoclim, CHELSA

Abstract

A Comparative Analysis of Climate Change Magnitude and Direction in Europe from the Pliocene to the Anthropocene

Understanding paleo-climate changes on Earth is crucial for the development of global climate models that predict the climate of the 21st century, while these changes also serve as an important driver of recent biodiversity patterns. In this paper, we use Change Vector Analysis (CVA) to examine changes in average annual air temperature and precipitation in Europe, based on the PaleoClim and CHELSA databases, from the Pliocene to the end of the 21st century. We focus on regional similarities and differences in the magnitude and direction of changes. The results highlight the natural dynamics of the climate and serve as a calibration for future change forecasts, which form the basis for current and future adaptation strategies in Europe.

Keywords

mean annual precipitation, mean annual air temperature, CVA, NMDS, Paleoclim, CHELSA



© Avtorja/
Authors, 2024



Univerzitetna založba
Univerze v Mariboru

1 Uvod

Zemlja je dinamičen planet. Neprestano se spreminja od svojega nastanka naprej. Stabilna obdobja brez sprememb so na Zemlji bolj izjema kot pravilo. Slednje še posebej velja za njeno atmosfero. Srbski geofizik in astronom Milutin Milanković je pred stoletjem (1920) dokazal, da variacije v treh vrstah Zemljinih orbitalnih gibanj (ekscentričnost, nagib osi in precesija osi) vplivajo na to, koliko sončnega sevanja (insolacije) na različnih geografskih širinah doseže vrh Zemljine atmosfere. Tako velja pravilo, da Milankovičevi cikli, v srednjih geografskih širinah (30° do 60° severno in južno od ekvatorja), pojasnjujejo do 25 odstotkov variacije v prejeti insolaciji (NASA, 2020). Skupaj z drugimi naravnimi procesi na Zemlji (tektonika plošč, vulkanizem, razvoj živih bitij itd.) so omenjeni astronomski vzroki glavno gonilo paleo-podnebnih sprememb (Saltzman, 2002).

V prispevku po krono-sekvencah ($n=13$), vse od pliocena (pred 3,3 mio let) do konca 21. stoletja (2071-2100) obravnavamo jakost in smer sprememb povprečne letne temperature zraka [$^{\circ}\text{C}\cdot 10$] in povprečne letne količine/višine padavin [mm] v širšem evropskem prostoru.

Številne študije paleo-podnebnih sprememb se, zaradi boljšega razumevanja dolgoročnih učinkov povišane koncentracije CO_2 v atmosferi, pogosto osredotočajo na geološko epoko pliocen (pred 5,2 do 2,6 milijona let) (Dolan idr., 2015; Lunt idr., 2010). Pozni pliocen predstavlja najbolj nedavni čas v Zemljini zgodovini, ko so bile temperature zraka višje od recentnih zaradi povišane koncentracije ogljikovega dioksida (CO_2) v atmosferi, ki je bila za 50 do 125 ppm višja od stanja v recentni predindustrijski dobi (Bartoli idr., 2011; Dowsett idr., 2010; Haywood & Valdes, 2004). Kljub temu je tudi v tem geološkem obdobju prihajalo do podnebnih sprememb. Med najpomembnejšimi je faza glaciacije M2 pred 3,3 milijona let (Dolan idr., 2015). Pliocenu sledil doba pleistocen, ki je trajala od 2,6 milijona let do 11.700 let pred sedanostjo (Gradstein idr., 2020). Omenjena epoha je bila zaznamovana s hitrimi in intenzivnimi geomorfološkimi procesi, ki so bili posledica izmenjavanja toplih in hladnih obdobj, predvsem zaradi astronomskih vplivov (Milankovičevi cikli). Drastične ohlavitve v tem obdobju so vodile v ledene dobe, imenovane pleistocenske poledenitve (glaciali). Z ledom je bilo pokritega tudi do 30 % planeta, povprečna temperatura zraka pa je bila nižja za 10 $^{\circ}\text{C}$ v primerjavi z današnjo (Prothero & Dott, 2010). Daljšim obdobjem ledenih dob so sledila krajša obdobja s toplejšim podnebjem, imenovana medledene dobe (interglaciali), pri čemer je bila razlika v povprečni temperaturi zraka približno 8 $^{\circ}\text{C}$ (Bahar, 2020). Delež CO_2 se je gibal med 0,02 % v hladnih obdobjih (glacialih), ter 0,03 % v toplih obdobjih (interglacialih), kar predstavlja najnižji vrednosti atmosferske koncentracije CO_2 v Zemljini zgodovini (Bahar, 2020). Za holocen (pred 11.700 leti do danes), ki sledi pleistocenu, je značilen razvoj sodobne človeške družbe (Mayewski idr., 2004), ki postaja (je) pomembna preoblikovalka okolja (Crutzen, 2006). Prehod iz pleistocena v holocen je bil zaznamovan z močno in dolgotrajno otoplitvijo, ki se je začela s koncem zadnje ledene dobe pred 11.700 leti (Božič Nosan, 2020). Tudi holocen je podnebno dinamično obdobje, saj je skozi njegovo zgodovino prišlo do vsaj šestih hitrih podnebnih sprememb, ki so se kazale v polarnem ohlajanju, tropskih sušah ter velikih spremembah v atmosferskem kroženju (Mayewski idr., 2004). Kakorkoli, danes je glavni povzročitelj podnebnih sprememb človek. Antropogeno pospešene podnebne spremembe 21. stoletja so namreč posledica predvsem človekove ekonomske aktivnosti, vezane na izkoriščanje fosilnih goriv (Summerhayes & Zalasiewicz, 2018). Leta 2000 je atmosferski kemik Paul Crutzen vpeljal izraz antropocen, ki označuje

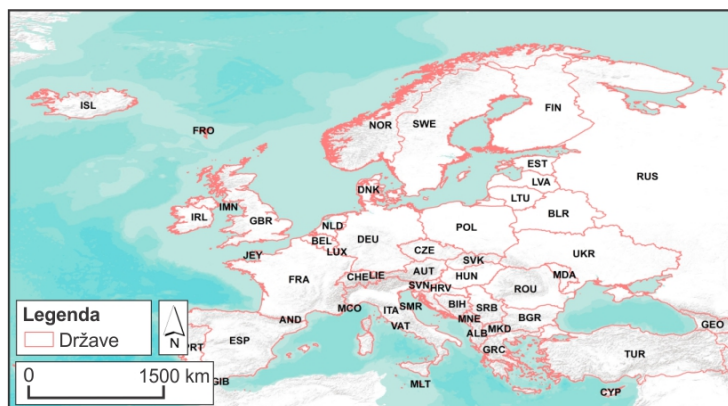
novo (neuradno) geološko epoko v kateri za glavno gonilno silo (podnebnih in okoljskih) sprememb velja človek. Po Crutzeniu (Summerhayes & Zalasiewicz, 2018) bi se obdobje antropocen pričelo z zasnovno parnega stroja leta 1784. Globalna temperatura zraka se je od predindustrijskega obdobja (1860-1900) do danes povišala za 1,2 °C. Koncentracija CO₂ v ozračju v tem obdobju narašča za 20 ppm na desetletje, kar je 100-krat hitreje od večine porastov CO₂ v zadnjih 800.000 letih (Summerhayes & Zalasiewicz, 2018). Atmosferska koncentracija CO₂ je leta 2023 dosegla 420 ppm, kar je približno 130 ppm nad najvišjimi globalnimi atmosferskimi ravnmi CO₂ v preteklih interglacialih, koncentracija toplogrednega plina metan (CH₄) pa se je v enakem obdobju dvignila še za večji delež glede na pretekla medledena obdobja (Summerhayes & Zalasiewicz, 2018). Temperaturna anomalija 1,2 °C v letu 2016 je bila 0,4 °C nad povprečno globalno temperaturo, ocenjeno za holocenski toplotni optimum pred 9.000–6.000 leti, s čimer se je naše podnebje približalo najtoplejšim temperaturam zraka zadnjega medledenega obdobja. Posledično se umikajo ledeniki, svetovna gladina morja pa trenutno narašča za 3,2 mm/leto ter tako dosega višje ravni kot kadar koli od konca zadnjega medledenega obdobja (Summerhayes & Zalasiewicz, 2018).

Kakšna bo torej naša prihodnost z vidika povprečne letne temperature zraka in količine/višine padavin? V okviru projekta CMIP6 (Eyring idr., 2016) je bilo razvitih pet podnebnih scenarijev za 21. stoletje (SSP1 [trajnostnost - nizki izzivi za ublažitev in prilagoditev], SSP2 [srednja pot – srednji izzivi za ublažitev in prilagoditev], SSP3 [regionalno rivalstvo – visoki izzivi za ublažitev in prilagoditev], SSP4 [neenakost – nizki izzivi za ublažitev, visoki izzivi za prilagoditev] ter SSP5 [na fosilna goriva vezan razvoj - visoki izzivi za ublažitev, nizki izzivi za prilagoditev]). Da bi ugotovili in primerjali bodočo jakost in smer podnebnih sprememb s preteklimi, smo v analizi obravnavali, ta trenutek realistični, sicer pa najbolj pesimistični scenarij SSP5-8.5. Le-ta predvideva povečanje neto sevanja za 8,5 W/m² do leta 2100, kar lahko povzroči globalno segrevanje za 3,3–5,7 °C (Hausfather, 2018). Za napovedovanje podnebnih trendov je ključno razumevanje pretekle podnebne dinamike, še posebej v luči zagotavljanja podnebno odporne družbe in zelenega prehoda (Shokry idr., 2022; Van Daalen idr., 2022).

2 Metodologija

2.1 Območje raziskave

V prispevku obravnavamo območje evropskega prostora, pri čemer smo v okolju geografskih informacijskih sistemom pripravili masko v obliki kvadrata, ki posledično zaobjema še okolico (Slika 1). Pri analizi podatkov se osredotočamo na interpretacijo rezultatov po državah na območju raziskave.



Slika 1: Območje raziskave.

Vir: HCMGIS, 2024.

2.2 Podatkovne baze

Da bi ocenili intenzivnost in smer podnebnih sprememb (ob upoštevanju povprečne letne temperature zraka in količine/višine padavin) v evropskem prostoru od pliocena do antropocena, smo uporabili prosto dostopno bazo podnebnih kazalcev portalov Paleoclim (Brown idr., 2018) ter CHELSA V2.1 (Brun idr., 2022; Karger idr., 2017). Obravnavali smo dve bioklimatski spremenljivki, bio1 (povprečna letna temperatura zraka [v °C*10]) ter bio12 (povprečna letna količina/višina padavin [v mm]) v prostorski ločljivosti 2,5 arc-minut (velikost slikovne enote ~5 km). V luči obeh kazalcev (bio1 in bio12) smo analizirali spremembe v vseh dostopnih časovnih oknih (krono-sekvencah) za preteklost (n=11), sedanost (1979-2013) ter prihodnost (časovno okno 2071-2100, scenarij SSP5-8.5, globalna podnebna modela MPI-ESM1-2-HR [Max Planck Institute for Meteorology, Nemčija] in IPSL-CM6A-LR [Institute Pierre Simon Laplace, Francija]) (Preglednica 1). Po prenosu podatkov smo le-te v okolju geografskih informacijskih sistemov prostorsko poenotili (koordinatni sistem WGS84) in omejili glede na mejo našega raziskovanega območja (Slika 1). V nadaljevanju smo za potrebe lažje interpretacije rezultatov primerjali jakost in smer podnebnih sprememb, v luči spremenljivk bio1 in bio12, po državah Evrope (in širše). Vektorski sloj političnih meja smo pridobili na statističnem portalu Evropske komisije (EuroStat, 2024).

Preglednica 1: Obravnavani časovni preseki in pripadajoči viri podatkov.

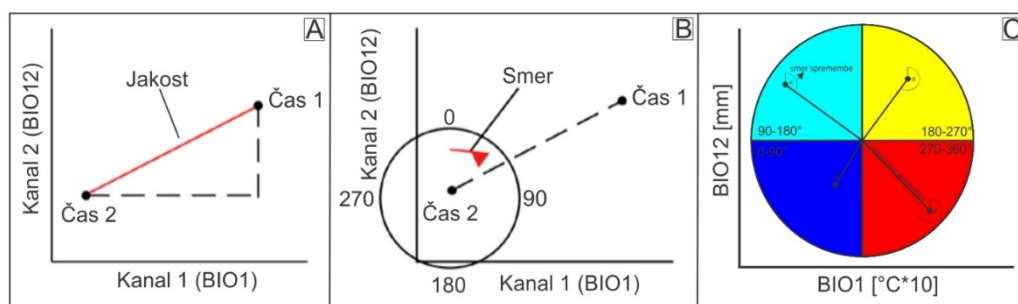
Vir: Avtorja.

ID	Časovno okno	Vir
13(2)	Prihodnost (2071-2100): SSP5-8.5, IPSL-CM6A-LR	Brun idr., 2022; Karger idr., 2017
13(1)	Prihodnost (2071-2100): SSP5-8.5, MPI-ESM1-2-HR	Brun idr., 2022; Karger idr., 2017
12	Sedanost (1979 – 2013): Antropocen, v1.2b**	Brun idr., 2022; Karger idr., 2017
11	Pleistocen: pozni-Holocen, Meghalayan (pred 4.200-300 leti), v1.0	Fordham idr., 2017 (Fordham idr., 2017)
10	Pleistocen: srednji-Holocen, Northgrippian (pred 8.326-4.200 leti), v1.0	Fordham idr., 2017
9	Pleistocen: zgodnji-Holocene, Greenlandian (11.700-8.326 leti), v1.0	Fordham idr., 2017
8	Pleistocen: stadij Younger Dryas (pred 12.900-11.700 leti), v1.0	Fordham idr., 2017
7	Pleistocen: stadij Bølling-Allerød (pred 14.700-12.900 leti), v1.0	Fordham idr., 2017

6	<i>Pleistocen</i> : stadij <i>Heinrich 1</i> (pred 17.000-14.700 leti), v1.0	Fordham idr., 2017
5	<i>Pleistocen</i> : zadnji glacialni maksimum (pred 21.000 leti), v1.2b**, <i>NCAR CCSM4</i>	Brun idr., 2022; Karger idr., 2017
4	<i>Pleistocen</i> : zadnji interglacial (pred 130.000 leti), v1.0	Otto-Bliesner idr., 2006 (Otto-Bliesner idr., 2006)
3	<i>Pleistocen</i> : stadij <i>MIS19</i> (pred 787.000 leti), v1.0*	Brown idr., 2018 (Brown idr., 2018)
2	<i>Pliocen</i> : toplo obdobje srednjega-Pliocena (pred 3,205 mio let), v1.0*	Hill, 2015 (Hill, 2015)
1	<i>Pliocen</i> : stadij <i>M2</i> (pred 3,3 mio let), v1.0*	Dolan idr., 2015 (Dolan idr., 2015)

2.3 Analiza podatkov

Sledila je predobdelava pridobljenih podatkov. Za potrebe vektorske analize sprememb (ang. *Change Vector Analysis*; CVA) v programskem okolju TerrSet2020 (Clark Labs, 2022) smo vse sloje (2 spremenljivki [bio1, bio12] x 14 časovnih oken) preoblikovali v ustrezen zapis (.rst) s pomočjo vmesnika ASCII. Izpeljali smo CVA po kronoloških parih/sekvencah (ID 1,2; ID 2,3; ID 3,4 ...) pri čemer smo za prvi kanal upoštevali spremenljivko bio1 (povprečna letna temperatura zraka [$v^{\circ}C \cdot 10$]), za drugi kanal pa spremenljivko bio12 (povprečna letna količina padavin [$v\text{ mm}$]). Produkta CVA ([1] jakost ter [2] smer sprememb; Slika 2) smo v nadaljevanju s pomočjo orodij zonalne statistike povprečili glede na vektor držav raziskovanega območja.



Slika 2: Shematski prikaz produktov analize CVA; jakost sprememb (A), smer sprememb (B in C).

Vir: Povzeto po Eastman, 2016.

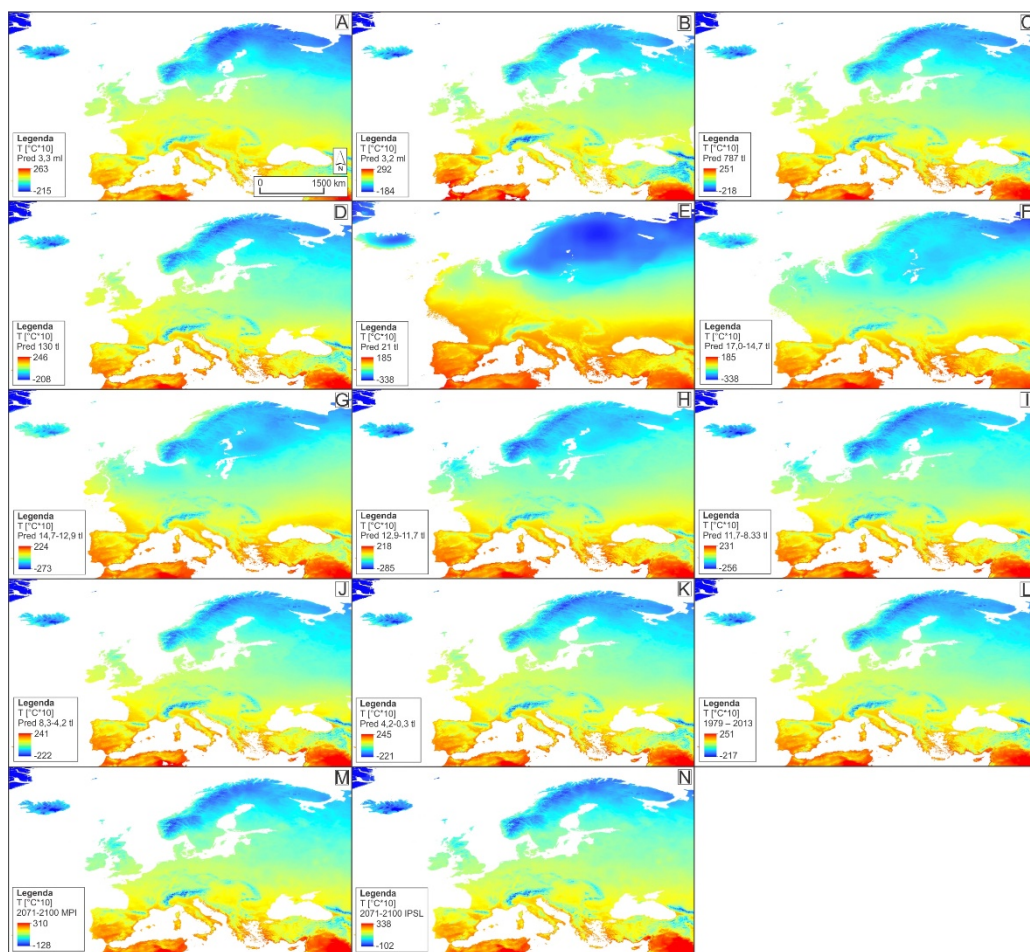
V nadaljevanju smo iskali podobnosti v jakosti in smeri podnebnih sprememb po dobljenih krono-sekvencah ($n=13$) glede na kazalca bio1 in bio12 med političnimi enotami (državami). Za vizualizacijo smo uporabili prostor NMDS (ang. *Non-metric Multi-Dimensional Scaling*), ki smo ga oblikovali s pomočjo funkcije *vegdist* in matrike Evklidskih razdalj s paketom *vegan* (Oksanen idr., 2008) v odprtokodnem programskem okolju R (R Development Core Team, 2023). Države smo v nadaljevanju, glede na podobnost kazalcev jakost in smer podnebnih sprememb kategorizirali s pomočjo multivariatne analize razvrščanja podatkov z voditelji (ang. *Kmeans clustering*) (število brstov = 10; število ponovitev = 20; število skupin/kategorij = 3). Razlike med skupinami držav po obeh kazalcih jakost ter smer sprememb (glede na spremenljivki bio1 in bio12) smo v nadaljevanju testirali s permutacijsko analizo variance (PERMANOVA; 999 ponovitev) v programskem okolju R (R Development Core Team, 2023). Pri kazalcu jakost sprememb, glede na vrednosti spremenljivk bio1 in bio12, smo zaradi velikega variacijskega razmika, uporabili Hellingerjevo transformacijo podatkov. Uporabili smo funkcijo *decostand* v

paketu *vegan* (Oksanen idr., 2008). Na ta način smo zmanjšali težo večjih vrednosti dane spremenljivke in hkrati ohranili razmerje evklidskih razdalj med obravnavanimi državami v NMDS prostoru (Legendre & Gallagher, 2001). Vzporedno smo izvedli še kontrolna preizkusa *betadisper* in *permutest*, ki sta preverila variabilnost v razpršenosti držav po skupinah v prostoru NMDS glede na spremenljivki jakost ali smer sprememb. Analizo smo zaključili z implementacijo algoritma *simper* (ang. *similarity percentages*) za kazalca jakost in smer sprememb ločeno (glede na kazalca *bio1* in *bio12*), s čimer smo pridobili informacije o tem, v katerem časovnem oknu (krono-sekvenci) so razlike v jakosti in smeri podnebnih sprememb med skupinami držav v evropskem prostoru značilno različne ($p < \alpha$; $\alpha = 0,05$).

3 Rezultati

3.1 Pretekle in bodoče temperaturne razmere v evropskem prostoru

Pretekli (A do K), recentni (L) in prihodnji (M, N) prostorski vzorec spremenljivke *bio1* (povprečna letna temperatura zraka [$v^{\circ}C \cdot 10$]) prikazuje mozaik na Sliki 3. Zaznavne so spremembe vrednosti spremenljivke *bio1* med posameznimi časovnimi preseki, bodisi po geografski širini in dolžini, bodisi po nadmorski višini. Izpostavimo lahko tudi spreminjanje obale oziroma meje kopno-morje ob menjavanju hladnejših (E do I) in toplejših (A do D) obdobj. Najnižje vrednosti povprečne letne temperature zraka ($^{\circ}C \cdot 10$) dosega časovni presek E, ki prikazuje ocenjeno stanje ob nastopu zadnje maksimalne poledenitve (pred 21.000 leti). V primerjavi z recentnim stanjem (1979-2013; L), so bile po obravnavani oceni povprečne letne maksimalne temperature zraka takrat v širšem evropskem prostoru nižje za 6,6 $^{\circ}C$, povprečne minimalne temperature zraka pa nižje za 12,1 $^{\circ}C$. Najbolj podoben prostorski vzorec spremenljivke *bio1*, v primerjavi s sedanjostjo, prikazuje njena ocena za obdobje *MIS19* (pred 787.000 leti) (C). Ob upoštevanju scenarija izpustov toplogrednih plinov SSP5-8.5 in napovedi globalnih podnebnih modelov MPI-ESM1-2-HR ter IPSL-CM6A-LR, ob koncu 21. stoletja (M, N) lahko pričakujemo primerljiv prostorski vzorec povprečne temperature zraka z obdobjem pred približno 3,2 milijona let (toplo obdobje srednjega pliocena).

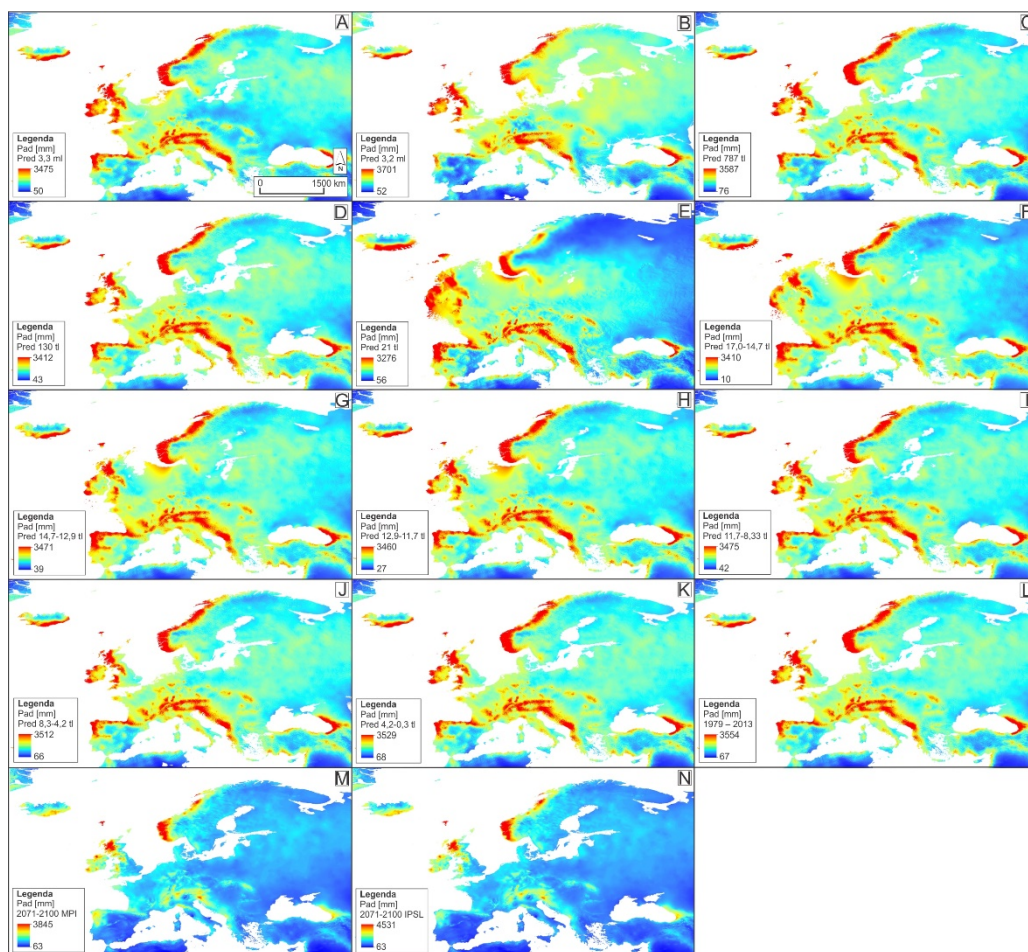


Slika 3: Spremenljivka bio1 (povprečna letna temperatura zraka [$v^{\circ}C*10$]) po obravnavanih krono-sekvencah (A do N).

Vir: Avtorja.

3.2 Pretekle in bodoče padavinske razmere v evropskem prostoru

Ocene razporeditve in količine/višine padavin v obravnavanih časovnih presekih nakazujejo bolj homogeni vzorec (Slika 4). Lega ob Atlantiku, reliefna energija ter celinskost sooblikujejo prostorski padavinski vzorec, ki od pliocena do danes, z nekaj izjemami (E), ostaja dokaj podoben. Tudi količina padavin po obravnavanih ocenah ni imela velikega variacijskega razmika. Tako največjo količino padavin (do 3,701 mm) v preteklosti kaže ocena za toplo obdobje srednjega pliocena (pred približno 3,2 milijona let), najnižjo pa obdobje zadnje največje poledenitve (pred 21.000 leti) (3276 mm). Napovedi (do konca 21. stoletja) ne predvidevajo večjih sprememb prostorskega padavinskega vzorca, znatno pa bi se, ob upoštevanju pesimističnega scenarija SSP5-8.5, lahko povečala njihova količina (ponekod tudi do 4500 mm) in variabilnost (večji variacijski razmik).



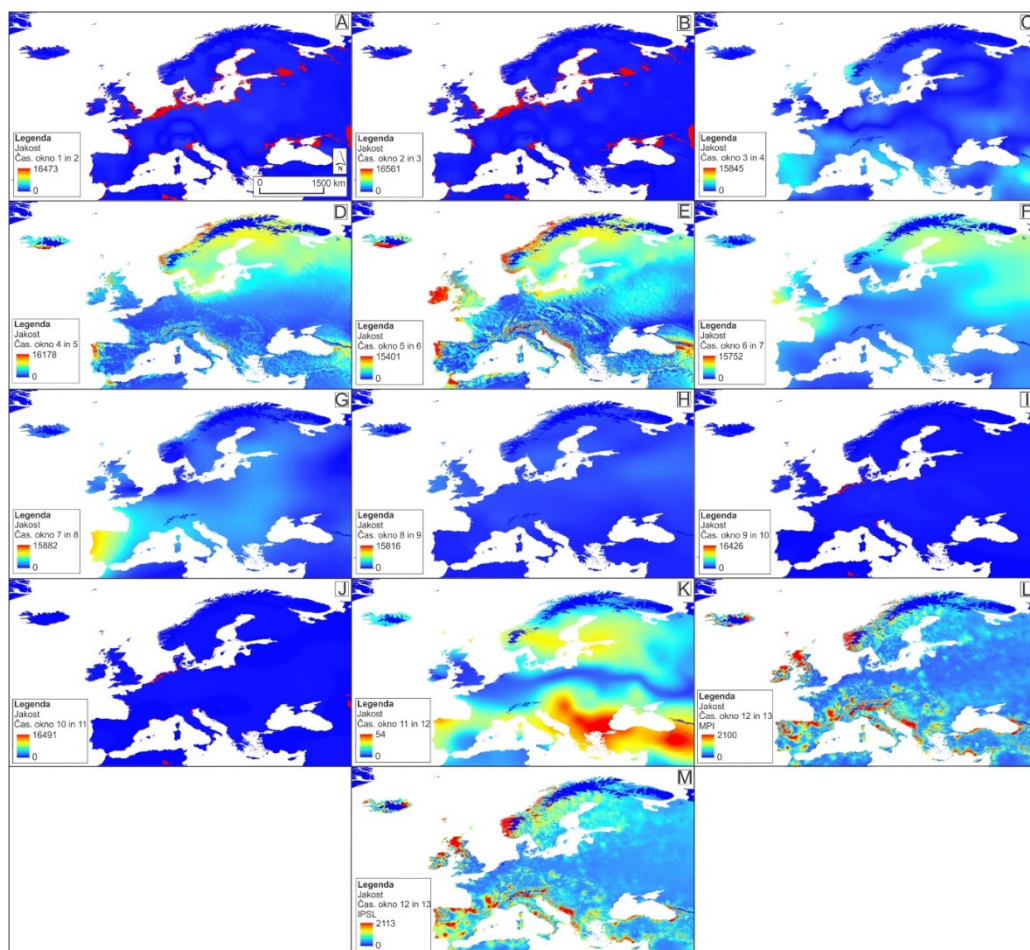
Slika 4: Spremenljivka bio12 (povprečna letna količina/višina padavin [v mm]) po obravnavanih krono-sekvencah (A do N).
Vir: Avtorja.

3.3 Jakost podnebnih sprememb v evropskem prostoru od pliocena do antropocena

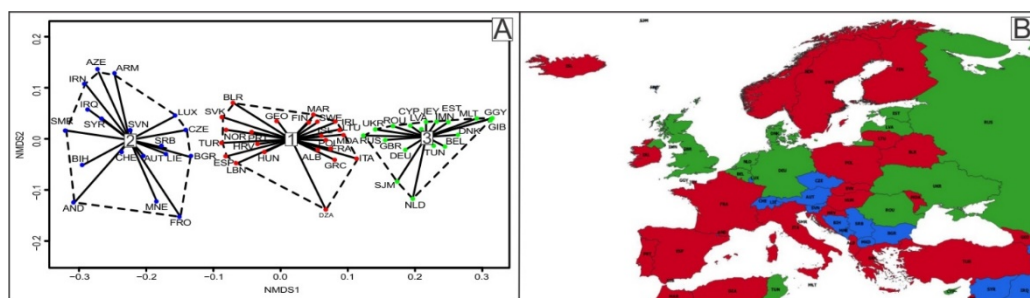
Časovno sosledje jakosti sprememb ob upoštevanju spremenljivk bio1 (povprečna letna temperatura zraka [v °C*10]) in bio12 (povprečna letna količina padavin [v mm]) prikazuje mozaik (A do M) na Sliki 5. Zaznavna je velika variabilnost vektorja jakosti v posameznih časovnih presekih. Iz pliocena v pleistocen maksimalne vrednosti dosegajo predvsem obalni in nižinski predeli obravnavanega območja. Po zadnjem obdobju maksimalne poledenitve (E) visoke vrednosti jakosti sprememb dosegajo predeli umikanja ledenega pokrova ter priobalni pas. Iz zgodnjega v srednji holocen (I) ter iz srednjega v pozni holocen (J) je prostorski vzorec jakosti sprememb iz zornega kota spremenljivk bio1 in bio12 podoben tistemu iz pliocena v pleistocen (B). Vektor jakosti v časovnem preseku pozni holocen-recentno stanje (K) izgubi na dolžini (vrednosti), ima pa značilno drugačen prostorski odtis. Večja ocenjena jakost sprememb je zaznavna v dveh pasovih po geografski širini (med 55 in 60° s.g.š. ter

med 35 in 45° s.g.š.), oziroma ob Baltskem in Sredozemskem morju. Kot v vseh obravnavanih krono-sekvencah so najbolj stabilna območja Skandinavsko gorovje in visoki predeli Alp ter Islandije. Prognoze za prihodnost (L, M) ocenjujejo postopno povečevanje jakosti sprememb praktično po celotnem evropskem prostoru (z izjemo visokih Alp in Skandinavskega gorovja). Predvsem v sredozemskem pasu lahko pričakujemo največjo jakost sprememb bodisi povprečne letne temperature zraka bodisi zmanjšanje količine/višine padavin.

Na jakost podnebnih sprememb v luči spremenljivk bio1 in bio12 smo pogledali še iz politično-geografskega konteksta. Slika 6 prikazuje skupine političnih enot (držav) na območju raziskave, ki so si po jakosti sprememb povprečne temperature zraka in povprečne letne količine/višine padavin bodisi podobne (znotraj skupine) bodisi različne (med skupinami) (Slika 6). Z analizo razvrščanja z voditelji smo oblikovali tri značilno različne skupine (PERMANOVA p-vrednost $< \alpha$; $\alpha = 0,05$) držav glede na jakost sprememb v obravnavanih krono-sekvencah. Neznačilna preizkusa *betadisper* ($p = 0,321$; $\alpha = 0,05$) in *permutest* ($p = 0,337$; $\alpha = 0,05$) dokazujeta, da je razpršenost držav glede na centroid skupine podobna, kar opravičuje uporabo analize *simper*, ki v našem primeru ugotavlja doprinos posamezne krono-sekvence k zaznamim razlikam v jakosti sprememb v luči spremenljivk bio1 in bio12 med skupinami držav v obravnavanem prostoru. Skupino 1 (rdeča barva) tvori 23 političnih enot (v Evropi Albanija, Andora, Belorusija, Finska, Francija, Gibraltar, Grčija, Hrvaška, Irska, Islandija, Italija, Litva, Madžarska, Malta, Moldavija, Norveška, Poljska, Portugalska, San Marino, Slovaška, Švedska, Španija, Turčija), skupino 2 (modra barva) tvori 19 enot (v Evropi Avstrija, Bosna in Hercegovina, Bulgarija, Češka, Črna gora, Lihtenštajn, Luksemburg, Severna Makedonija, Slovenija, Srbija, Švica), skupino 3 (zelena barva) pa 18 enot (v Evropi Belgija, Ciper, Danska, Estonija, Latvija, Nemčija, Nizozemska, Romunija, Rusija, Ukrajina, Združeno kraljestvo).



Slika 5: Jakost sprememb temperaturnih (bio1) in padavinskih (bio12) razmer po obravnavanih krono-sekvencah (A do M) (Preglednica 1).
Vir: Avtorja.



Slika 6: Prikaz skupin držav s podobno (znotraj skupine) ali različno (med skupinami) dinamiko jakosti sprememb temperaturnih in padavinskih razmer po obravnavanih krono-sekvencah v prostoru NMSD (A) in na zemljevidu (B).
Vir: Avtorja.

Iz Preglednice 2 lahko razberemo v katerih krono-sekvencah se skupine političnih enot (držav) značilno razlikujejo po jakosti sprememb v luči spremenljivk bio1 in bio12. Skupini 1 in 2 se po jakosti sprememb najbolj razlikujeta v sekvencah pliocen M2 – toplo obdobje srednjega pliocena [1_2] (z večjo jakostjo v državah skupine 1), sedanost – prihodnost (MPI-ESM1-2-HR) [12_13(1)], sedanost – prihodnost (IPSL-CM6A-LR) [12_13(2)]. V obeh krono-sekvencah za prihodnost se pričakuje večja jakost sprememb z vidika spremenljivk bio1 in bio12 v državah iz skupine 2. Sledijo še sekvence pleistocen *MIS19* – zadnji interglacial [3_4], pleistocen *Bølling-Allerød* stadij – pleistocenski stadij *Younger Dryas* [7_8] ter pozni holocen – sedanost [11_12]. Pri slednjih je ocenjena jakost sprememb značilno večja v državah iz skupine 2. V preostalih krono-sekvencah je bila jakost sprememb med skupinama držav 1 in 2, v koordinatnem sistemu spremenljivk bio1 in bio12, podobna.

Preglednica 2: Številski povzetek primerjava parov skupin držav po obravnavanih krono-sekvencah z vidika jakosti sprememb vezanih na temperaturne in padavinske razmere.

Vir: Avtorja.

Kontrast: 2_1								
ID	rang	povprečje	sd	razmerje	ava	avb	p-vrednost	
1_2	1	0.074	0.030	2.483	0.137	0.284	0.025	*
12_13(1)	3	0.033	0.024	1.376	0.118	0.052	0.002	**
12_13(2)	4	0.033	0.019	1.747	0.132	0.067	0.010	**
3_4	7	0.021	0.017	1.244	0.063	0.028	0.002	**
7_8	8	0.013	0.009	1.397	0.042	0.026	0.063	.
11_12	12	0.008	0.006	1.481	0.024	0.010	0.002	**
Kontrast: 2_3								
2_3	1	0.140	0.028	5.055	0.126	0.406	0.001	***
1_2	2	0.135	0.029	4.576	0.137	0.407	0.001	***
12_13(2)	3	0.056	0.018	3.040	0.132	0.020	0.001	***
4_5	4	0.054	0.025	2.159	0.133	0.026	0.001	***
12_13(1)	5	0.051	0.024	2.140	0.118	0.016	0.001	***
5_6	6	0.041	0.021	1.967	0.104	0.021	0.001	***
3_4	7	0.028	0.019	1.467	0.063	0.008	0.001	***
7_8	8	0.018	0.011	1.666	0.042	0.007	0.001	***
6_7	9	0.017	0.009	1.907	0.046	0.013	0.001	***
11_12	12	0.011	0.006	1.771	0.024	0.003	0.001	***
8_9	13	0.008	0.005	1.639	0.021	0.008	0.001	***
Kontrast: 1_3								
10_11	7	0.017	0.016	1.057	0.033	0.032	0.032	*

ava = povprečna vrednost vhodne spremenljivke (jakost sprememb) prvega kontrasta, avb = povprečna vrednost vhodne spremenljivke (jakost sprememb) drugega kontrasta

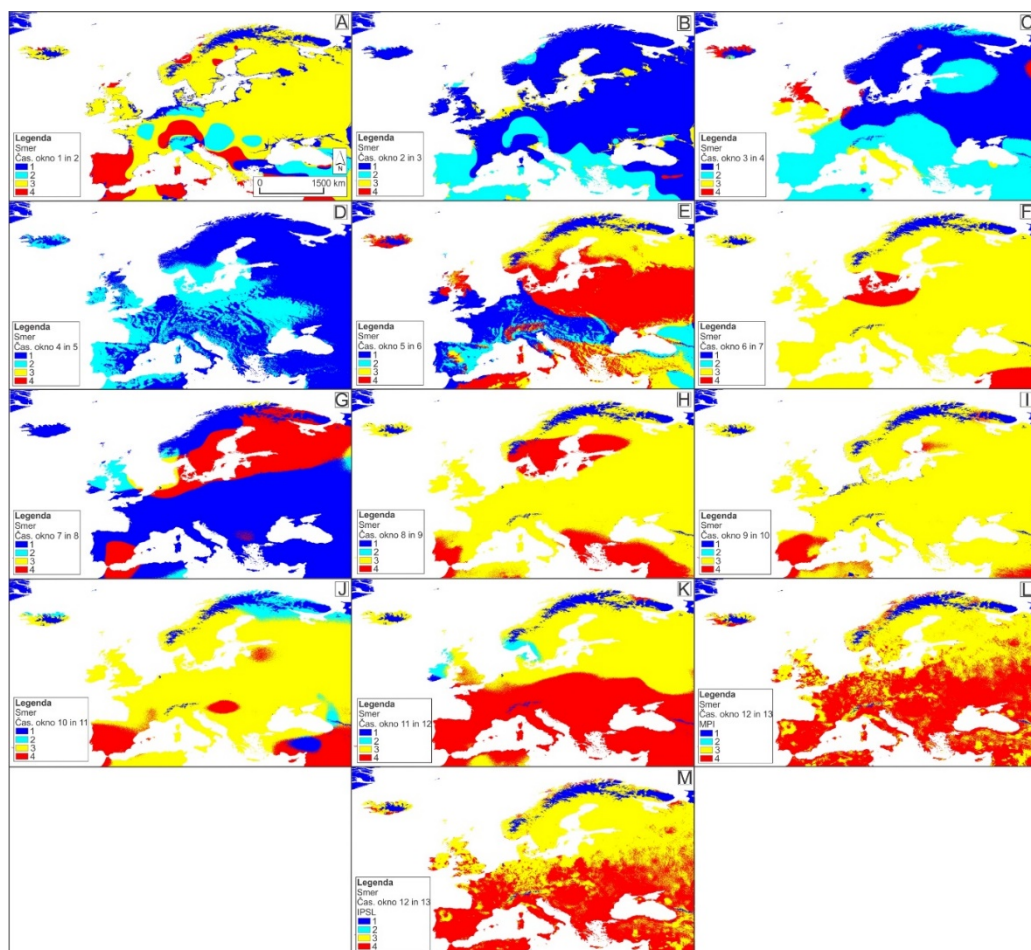
Če primerjamo skupini držav 3 in 1, ugotovimo, da so bile značilne razlike med njima v jakosti sprememb spremenljivk bio1 in bio12 le v krono-sekvenci srednji holocen – pozni holocen [10_11], z nekaj višjo jakostjo v državah iz skupine 1. Primerjava para skupin 2 in 3 pa kaže značilne razlike v jakosti sprememb praktično v vsaki obravnavani krono-sekvenci. Na prvem mestu po doprinosu k spremembam v jakosti je toplo obdobje srednjega pliocena (približno 3,2 milijona let) – pleistocen *MIS19* (787.000 let) [2_3] z značilno večjo jakostjo v državah iz skupine 3 (zelena barva). Na drugem mestu doprinosu k razlikam med skupnima je krono-sekvenca pliocen M2 (3,3 milijona let) - toplo obdobje srednjega pliocena (približno 3,2 milijona let) [1_2] s prav tako večjo jakostjo v državah iz skupine 3 (zelena barva). Temu po razlikah v jakosti sprememb že sledi sekvenca, ki napoveduje stanje za konec 21. stoletja [12_13(2)] pri čemer se pričakuje večja jakost sprememb v državah iz skupine 2

(modra barva). Podobno velja tudi za sekvenco zadnji interglacial (pred 130.000 leti) – zadnji glacialni maksimum (pred 21.000 leti) [4_5].

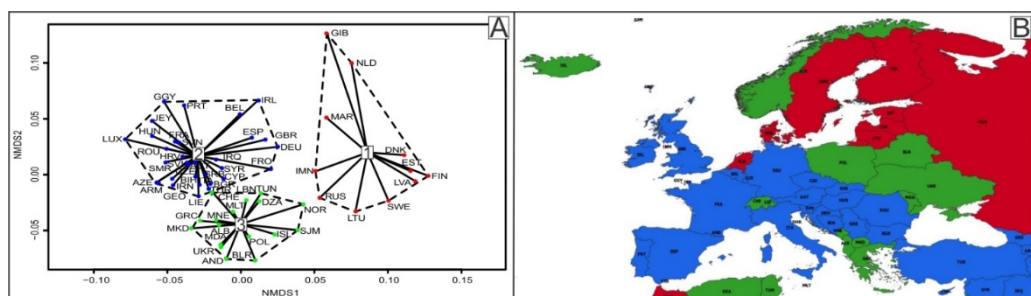
3.4 Smer podnebnih sprememb v evropskem prostoru od pliocena do antropocena

Na Sliki 7 je prikazan kategorizirani drugi produkt analize CVA, ki prikazuje smer sprememb v luči spremenljivk bio1 (kanal 1 = os x) in bio12 (kanal 2 = os y). Za lažjo interpretacijo smo oblikovali štiri razrede, ki prikazujejo naslednje smeri sprememb: 1 = 0-90°, zmanjševanje vrednosti bio1 (povprečna letna temperatura zraka [$v\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot 10$]) in zmanjševanje vrednosti bio12 (povprečna letna količina/višina padavin [$v\text{ mm}$]); 2 = 90-180°, zmanjševanje vrednosti bio1 in povečevanje vrednosti bio12; 3 = 180-270°, povečevanje vrednosti bio1 in povečevanje vrednosti bio12; ter 4 = 270-360°, povečevanje vrednosti bio1 in zmanjševanje vrednosti bio12. Prva krono-sekvence (A, [1_2]) prehod v toplo obdobje srednjega pliocena (približno 3,2 milijona let) po večini evropskega prostora nakazuje povečanje vrednosti obeh obravnavanih spremenljivk (bio1 in bio12), z izjemo Pirenejskega polotoka, predelov sredin in jugovzhodne Evrope, ki so bili takrat deležni zmanjševanja količine/višine padavin. Obraten proces (zmanjševanje povprečne letne temperature zraka in povečanje povprečne letne količine padavin) pa je zaznaven na predelih Alp, Panonskega bazena ter vzdolž Severnega in Črnega morja. Območja zmanjševanja vrednosti obeh spremenljivk so vezana na priobalni pas in Skandinavsko gorovje.

Že v naslednji krono-sekvenci (B; [2_3]) so smeri sprememb na obravnavanem območju drugačne, a podobne z naslednjima dvema (C [3_4] in D [4_5]). Po površini prevladujeta kategoriji 1 in 2, ki predstavljata bodisi ohladitev in zmanjšanje količine/višine padavin bodisi ohladitev in povečanje količine/višine padavin. Sledi po smeri sprememb bolj pestro obdobje 5_6 (E; zadnja maksimalna poledenitev-pleistocen stadij Heinrich). Severni in vzhodni predeli evropskega prostora so bili deležni bodisi otoplitve in povečanja količine/višine padavin bodisi otoplitve in zmanjšanja količine/višine padavin. Enak vzorec je zaznaven na predelih britanskega otočja, Alp ter Balkanskega polotoka. Po drugi strani so nekateri predeli Evrope istočasno postajali hladnejši in bolj sušni (zahodni in južni del Pirenejskega polotoka, deli srednje in vzhodne Evrope in severna Italija...) oziroma hladnejši in bolj vlažni (vzhodni del Pirenejskega polotoka, nižinski predeli srednje in južne Evrope). Po smeri sprememb so si podobne naslednje krono-sekvence: 6_7 (E), 8_9 (H), 9_10 (I) in 10_11 (J). V vseh po površini prevladujeta kategoriji 3 (otoplitev in povečanje količine/višine padavin) in 4 (otoplitev in zmanjšanje količine/višine padavin) z izjemo goratih predalov kjer sta se povprečna temperatura zraka in povprečna količina/višina padavin zmanjševali. V krono-sekvenci 11_12 (K; pozni holocen – recentno stanje) je prepoznavna zonacija zaznanih smeri sprememb vzdolž geografske širine. Južni in osrednji predeli raziskovanega območja so bili deležni segrevanja ozračja in zmanjševanja količine/višine padavin, med tem ko so severni predeli Evrope po večini (z izjemo Skandinavskega gorovja) bili deležni povečanja tako temperature zraka kot količine/višine padavin. Predvidena smer sprememb spremenljivk bio1 in bio12 do konca 21. stoletja (po obeh globalnih podnebnih modelih [MPI-ESM1-2-HR ter IPSL-CM6A-LR]), prikazano na Sliki 7 L in M, je po vzorcu primerjavi z krono-sekvenco 11_12 (pozni holocen – recentno stanje. Po površini v obeh napovedih prevladujeta smeri 3 (180-270°; povečanje vrednosti tako bio1 kot bio12) in 4 (270-360°; povečanje vrednosti bio1 in zmanjšanje vrednosti bio12). Zaznavna je sprememba smeri z višanjem geografske širine ali nadmorske višine, saj na dobljeni prostorski vzorec spremembe vplivajo številni naravno- in družbeno-geografski dejavniki.



Slika 7: Smer sprememb temperaturnih (bio1) in padavinskih (bio12) razmer po obravnavanih krono-sekvencah (A do M).
Vir: Avtorja.



Slika 8: Prikaz skupin držav z bodisi podobno (znotraj skupine) ali različno (med skupinami) dinamiko smeri sprememb temperaturnih in padavinskih razmer po obravnavanih krono-sekvencah v prostoru NMDS (A) in na zemljevidu (B).
Vir: Avtorja.

Tako kot pri jakosti smo tudi pri smeri sprememb v luči spremenljivk bio1 in bio12 iskali podobnosti in razlike med politično-geografskimi enotami (državami). Na enak način (s pomočjo analize razvrščanja z voditelji) smo oblikovali, po smeri sprememb, značilno različne skupine držav (PERMANOVA p-vrednost $< \alpha$; $\alpha = 0,05$), ki so prikazane v prostoru NMDS in na zemljevidu na Sliki 8. Skupino 1 (rdeča barva) sestavlja 11 držav (v Evropi Danska, Estonija, Finska, Latvija, Litva, Nizozemska, Rusija, Švedska), skupino 2 (modra barva) sestavlja 32 držav (v Evropi Andora, Avstrija, Belgija, Bosna in Hercegovina, Bulgarija, Ciper, Češka, Francija, Gibraltar, Hrvaška, Irska, Italija, Luksemburg, Madžarska, Malta, Nemčija, Portugalska, Romunija, San Marino, Slovaška, Slovenija, Srbija, Španija, Švica, Turčija, Združeno kraljestvo) in skupino 3 (zelena barva) 17 držav (v Evropi Albanija, Belorusija, Črna gora, Grčija, Islandija, Lihtenštajn, Moldavija, Norveška, Poljska, Severna Makedonija, Ukrajina). Neznačilnost kontrolnih statističnih preizkusov *betadisper* ($p = 0,2808$; $\alpha = 0,05$) in *permutest* ($p = 0,296$; $\alpha = 0,05$) je tudi tukaj opravičila uporabo algoritma *simper*, katerega povzetek je prikazan v Preglednici 3. Skupini držav 1 (rdeča barva) in 2 (modra barva) se po smeri sprememb spremenljivk bio1 in bio12 značilno razlikujeta v sedmih od trinajst obravnavanih krono-sekvencah. Največ k razlikam, po zaporedju, doprinesejo naslednje krono-sekvence: 7_8 (pleistocen stadij *Bølling-Allerød* [pred 14.700-12.900 leti] – pleistocen stadij *Younger Dryas* [pred 12.900-11.700 leti]), 5_6 (zadnji glacialni maksimum [pred 21.000 leti] – pleistocen stadij Heinrich [pred 17.000-14.700 leti]) in 11_12 (pozni holocen [pred 4.200-300 leti] – sedanjost [1979-2013]). V krono-sekvenci 7_8 so imele države iz skupine 2 značilno večjo povprečno vrednost kota sprememb (193; povečanje vrednosti tako spremenljivke bio1 kot spremenljivke bio12) v primerjavi s skupino 1 (22; zmanjšanje vrednosti spremenljivk bio1 in bio12). Obratno velja za krono-sekvenco 5_6, pri čemer je ocenjena povprečna vrednost kota sprememb skupine 1 (rdeča barva) enaka 294 (povečanje vrednosti spremenljivke bio1 in zmanjšanje vrednosti spremenljivke bio12), skupine 2 (modra barva) pa 173 (povečanje vrednosti obeh spremenljivk). Identičen vzorec smeri sprememb je zaznaven za krono-sekvenco 11_12. Na četrtem mestu doprinosi k razlikam med državami iz skupin 1 in 2 je krono-sekvencia 12_13(2), ki predstavlja oceno smeri sprememb do konca 21. stoletja v primerjavi z recentnim stanjem. Tudi v tem primeru se pričakuje na območju držav iz skupine 1 povečanje vrednosti spremenljivke bio1, hkrati pa zmanjšanje vrednosti spremenljivke bio12, medtem ko se na območju držav iz skupine 2 predvideva povečanje tako povprečne letne temperature zraka kot povprečne letne količine/višine padavin.

Preglednica 3: Številski povzetek primerjava parov skupin držav po obravnavanih krono-sekvencah z vidika smeri sprememb vezanih na temperaturne in padavinske razmere.

Vir: Avtorja.

Kontrast: 1_2								
ID	rang	povprečje	sd	razmerje	ava	avb	p-vrenost	
7_8	1	0.033	0.020	1.658	22.000	193.070	0.001	***
5_6	2	0.027	0.020	1.380	294.600	173.460	0.010	**
11_12	3	0.027	0.017	1.593	325.000	201.010	0.001	***
12_13(2)	4	0.019	0.015	1.268	305.000	224.020	0.001	***
3_4	5	0.018	0.014	1.323	137.700	110.070	0.008	**
12_13(1)	6	0.018	0.016	1.125	301.500	234.000	0.001	***
1_2	7	0.017	0.014	1.244	219.900	153.170	0.010	**
2_3	8	0.016	0.010	1.558	115.600	68.240	0.002	**

8_9	9	0.012	0.013	0.905	266.700	223.570	0.010	**
Kontrast: 1_3								
5_6	1	0.033	0.015	2.155	294.600	123.700	0.001	***
2_3	2	0.015	0.010	1.568	115.600	54.400	0.002	**
Kontrast: 3_2								
7_8	1	0.036	0.021	1.699	16.700	193.070	0.001	***
11_12	2	0.030	0.018	1.664	333.300	201.010	0.001	***
3_4	4	0.020	0.014	1.378	161.600	110.070	0.001	***
12_13(2)	5	0.017	0.016	1.105	288.000	224.020	0.001	***
12_13(1)	6	0.017	0.016	1.056	296.800	234.000	0.001	***
10_11	7	0.016	0.016	1.018	248.300	202.250	0.007	**
6_7	10	0.010	0.012	0.838	230.100	211.760	0.031	*

ava = povprečna vrednost vhodne spremenljivke (jakost sprememb) prvega kontrasta, avb = povprečna vrednost vhodne spremenljivke (jakost sprememb) drugega kontrasta

Če primerjamo skupini držav 1 (rdeča barva) in 3 (zelena barva), lahko na podlagi analize *simper* sklepamo, da k razlikam v smeri sprememb spremenljivk bio1 in bio12 značilno doprineseta predvsem dve krono-sekvenci (skupaj 36%); in sicer 5_6 (zadnji glacialni maksimum [pred 21.000 leti] – pleistocen stadij *Heinrich* [pred 17.000-14.700 leti]) ter 2_3 (toplo obdobje srednjega pliocena [pred 3,205 mio leti] – pleistocen *MIS19* [pred 787.000 leti]). V skupini 1 (rdeča barva), v krono-sekvenci 5_6, beležimo smer povečevanja vrednosti spremenljivke bio1 in zmanjševanje vrednosti spremenljivke bio12, medtem ko so bile države iz skupine 3 (zelena barva) takrat deležne ohlajanja (zmanjševanje vrednosti spremenljivke bio1) in povečevanja letne količine padavin (povečevanje vrednosti spremenljivke bio12). Območje držav iz skupine 1 se je v krono-sekvenci 2_3 prav tako ohlajalo in postajalo bolj vlažno, območje držav, ki tvori skupino 3, pa se je takrat ohlajalo in postajalo bolj sušno. Primerjava območij, ki jih tvorijo države iz skupin 2 (modra barva) in 3 (zelena barva), v sedmih od trinajstih krono-sekvencah nakazuje značilne razlike smeri sprememb spremenljivk bio1 in bio12. Prva tri mesta po doprinosu k razlikam med skupinama držav 2 in 3 zasedajo krono-sekvence 7_8 (pleistocen stadij *Bølling-Allerød* [pred 14.700-12.900 leti] – pleistocen stadij *Younger Dryas* [pred 12.900-11.700 leti]), 11_12 (pozni holocen [pred 4.200-300 leti] – sedanost [1979-2013]) ter 3_4 (pleistocen *MIS19* [pred 787.000 leti] – zadnji interglacial [pred 130.000 leti]). V krono-sekvenci 7_8 je na območju držav skupine 2 ocenjena otoplitev in povečanje letne količine/višine padavin (povprečen kot sprememb enak 193°), prav nasprotno pa velja za območje, ki ga tvorijo države skupine 3 (povprečen kot sprememb enak 16,7°; zmanjševanje vrednosti spremenljivk bio1 in bio12). V krono-sekvenci 11_12 so države iz obeh primerjanih skupin (2 in 3) bile deležne otoplitve. Razlike se pojavijo pri spremenljivki bio12, kjer je bilo območje držav skupine 2 deležno povečanja, območje držav skupine 3 pa zmanjšanja povprečne letne količine/višine padavin. V krono-sekvenci 3_4 so procesi spreminjanja povprečne letne temperature zraka in količine/višine padavin na območjih držav skupin 2 in 3 podobni. Območje se je ohlajalo in postajalo bolj vlažno. Po doprinosu k razlikam med območji držav skupine 2 in 3 se na 5. in 6. mestu nahajata napovedi obeh obravnavanih globalnih podnebnih modelov (MPI-ESM1-2-HR ter IPSL-CM6A-LR) za konec 21. stoletja. Oba, območju skupne 3. napovedujeta značilno otoplitev in zmanjšanje količine/višine padavin, medtem ko v območju držav skupine 2 lahko pričakujemo otoplitev z povečanjem vlažnostnih razmer.

4 Sklep

Zgodovinski razvoj paleo-podnebnja je pomembno gonilo recentnih vzorcev biotske raznovrstnosti (biodiverzitete) (Fordham idr., 2017). Številne študije ekološkega modeliranja so potrdile visoko informativno moč paleo-podnebnih kazalcev oziroma podatkov. Paleo-podnebnne rekonstrukcije se običajno kombinirajo z okoljskimi in genetskimi podatki, da se ugotovijo učinki preteklih podnebnih sprememb na bogastvo vrst (Araújo idr., 2008), endemizem (Sandel idr., 2011) ter filogenetsko (Rosauer & Jetz, 2015) in funkcionalno raznolikost (Ordonez & Svenning, 2015). Uporabljajo se tudi za raziskovanje in preizkušanje hipotez o dinamiki priseljevanja in izumiranja vrst (Saltré idr., 2016) ter za razvoj strategij blaženja izgube biotske raznovrstnosti zaradi antropogeno pospešenih podnebnih sprememb (Fordham idr., 2014, 2016). Posledično obstaja velika težnja po povečanju časovne in prostorske ločljivosti paleo-podnebnih podatkov (in kazalcev), primernih za odkrivanje ekoloških in evolucijskih odzivov na pretekle podnebne spremembe. Do nedavnega je omejena razpoložljivost dostopnih podnebnih podatkov za časovna obdobja, ki niso srednji holocen (pred 6.000 leti), zadnji glacialni maksimum (LGM, pred 21.000 leti) ali zadnji interglacial (pred 130.000 leti), predstavljala veliko oviro (Brown & Knowles, 2012; Knowles idr., 2007). Korak naprej na tem področju predstavljajo podatki ekipe PaleoClim (Brown idr., 2018), ki temeljijo na kompleksnih matematičnih globalnih podnebnih modelih (HadCM3 in GCM), ki v desetih preteklih časovnih presekih (krono-sekvencah), simulirajo Zemljino atmosferko-oceansko dinamiko ob upoštevanju lokacije in oblike kopenskih mas, koncentracije plinov CO₂/N₂O/CH₄ ter orbitalne parametre (PaleoClim, 2024). Če k temu dodamo prosto dostopne (istovrstne) podnebne podatke (kazalce) za recentno obdobje (1979-2013) in prihodnost (CMIP6 protokol) iz baze CHELSA (Brun idr., 2022; Karger idr., 2017), lahko ugotavljamo in ocenjujemo prostorsko podobnost/različnost preteklih (naravnih) in bodočih (naravnih + antropogenih) podnebnih sprememb.

Tako v prispevku ugotavljamo, da so na obravnavanem območju, v luči spremenljivk povprečna letna temperatura zraka (v °C*10) [bio1] in povprečna letna količina/višina padavin (v mm) [bio12], še najbolj stabilna območja gorati predeli. Scherrer in Körner (2009) navajata, da so organizmi v gorskem pasu na splošno v boljšem položaju kot tisti v nižinskem pasu, ko se okoljske razmere spremenijo, saj specifična topografija ponuja mozaik alternativnih mikrohabitatov na kratkih razdaljah. Zato ni presenetljivo, da so bile gore v preteklosti vedno zatočišče (refugij) za mnoge rastlinske in živalske vrste v spreminjajočem se podnebnju. Po jakosti sprememb z vidika spremenljivk bio1 in bio12, na območju raziskave, prednjačijo krono-sekvence 1_2 (pliocen stadij M2 [pred 3,3 milijona let] – toplo obdobje srednjega pliocena [pred 3,205 milijona let]), 2_3 (toplo obdobje srednje pliocena [pred 3,205 milijona let] – pliocen stadij MIS19 [pred 787.000 leti]) in 9_10 (zgodnji holocen [pred 11.700-8.326 leti] – srednji holocen [pred 8.326-4.200 leti]). Ocene sprememb temperaturnih in padavinskih razmer za konec 21. stoletja, po pesimističnem scenariju SSP5-8.5, so po jakosti, v primerjavi z preteklimi obdobji, sicer v povprečju (po večini) nižje, vendar z značilnimi regionalnimi razlikami. Tako je predvideni prostorski vzorec jakosti sprememb temperaturnih in padavinskih razmer korono-sekvenc 12_13(1) in 12_13(2) na drugem, tretjem ali petem mestu po doprinosu k razlikam med območji, ki jih tvorijo države v skupini 1, 2 ali 3. Slednje dokazuje primerljivost bodočih podnebnih sprememb, v širšem evropskem prostoru, z jakostjo tistih iz obdobja pliocen (od 5,2 do 2,6 milijona let). Analiza in primerjava krono-sekvenc smeri sprememb temperaturnih in padavinskih razmer je potrdila podnebno dinamičnost evropskega prostora v zadnjih treh milijonih let, za katero so

značilni ponavljajoči se cikli ohlajanja in zmanjševanja oziroma povečevanja količine padavin v času ledenih dob ter segrevanja in podobno variabilne padavinske razmere v času medledenih obdobj. Pesimistične napovedi za konec 21. stoletja kažejo jasno smer otoplitve in povečanja sušnosti (predvsem v Sredozemlju) ali otoplitve in povečanja vlažnosti (količine/višine padavin) v višjih geografskih širinah evropskega prostora. Gre za prostorski trend, ki ga kažejo tudi krono-sekvenca 8_9 (pleistocen stadij *Younger Dryas* [pred 12.900-11.700 leti] - zgodnji-Holocen [pred 11.700-8.326 leti]), 9_10 (zgodnji-Holocen [pred 11.700-8.326 leti] - srednji-Holocen [pred 8.326-4.200 leti]), 10_11 (srednji-Holocen [pred 8.326-4.200 leti] - pozni-Holocen [pred 4.200-300 leti]) in 11_12 (pozni-Holocen [pred 4.200-300 leti] - sedanjost (Antropocen) [1979-2013]).

Tudi z vidika smeri sprememb temperaturnih in padavinskih razmer so zaznavne značilne regionalne razlike po obravnavanih krono-sekvencah. Oblikujemo lahko tri skupine držav, ki so si po dinamiki smeri sprememb temperaturnih in padavinskih razmer značilno različne, hkrati pa znotraj skupine podobne. K razlikam med skupinami, z vidika smeri sprememb, najbolj doprinesejo krono-sekvenca 5_6 (zadnji glacialni maksimum [pred 21.000 leti] – Pleistocen stadij Heinrich [pred 17.000-14.700 leti]), 7_8 (Pleistocen stadij *Bølling-Allerød* [pred 14.700-12.900 leti] – Pleistocen stadij *Younger Dryas* [pred 12.900-11.700 leti]) in 11_12 (pozni-Holocen [pred 4.200-300 leti] – sedanjost-Antropocen [1979-2013]). V bodoče se bo, po ocenah obravnavanih globalnih podnebnih modelov (MPI-ESM1-2-HR ter IPSL-CM6A-LR) evropski prostor predvsem segreval (z izjemo alpskega visokogorja in Skandinavskega gorovja). Ponekod bo postajal bolj sušen (območje držav skupine 3), drugod pa bolj vlažen (območje držav skupine 2).

Tovrstne primerjalne analize opozarjajo na naravno dinamiko podnebnega sistema našega planeta in hkrati lahko služijo kot umerjanje jakosti prognoz pripravljenih za konec 21. stoletja, na katerih temelji, oziroma bo temeljilo, trenutno in bodoče upravljanje evropskega prostora za blaženja in prilagajanja na antropogeno pospešene podnebne spremembe.

Literatura

- Araújo, M. B., Nogués-Bravo, D., Diniz-Filho, J. A. F., Haywood, A. M., Valdes, P. J., & Rahbek, C. (2008). Quaternary climate changes explain diversity among reptiles and amphibians. *Ecography*, 31(1), 8–15.
- Bahar, I. (2020). Podnebne spremembe skozi geološka obdobja, vzroki in posledice. In *Mednarodna konferenca podnebne spremembe* (pp. 68–81). https://podnebne.splet.arnes.si/files/2020/06/Mednarodna_konferenca_podnebne_spremembe.pdf
- Bartoli, G., Hönisch, B., & Zeebe, R. E. (2011). Atmospheric CO₂ decline during the Pliocene intensification of Northern Hemisphere glaciations. *Paleoceanography*, 26(4), PA002055. <https://doi.org/10.1029/2010PA002055>
- Božič Nosan, T. (2020). Paleoklimatske spremembe. In *Mednarodna konferenca podnebne spremembe* (pp. 82–88). https://podnebne.splet.arnes.si/files/2020/06/Mednarodna_konferenca_podnebne_spremembe.pdf
- Brown, J. L., Hill, D. J., Dolan, A. M., Carnaval, A. C., & Haywood, A. M. (2018). PaleoClim, high spatial resolution paleoclimate surfaces for global land areas. *Scientific Data*, 5, 180254. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.254>
- Brown, J. L., & Knowles, L. L. (2012). Spatially explicit models of dynamic histories: Examination of the genetic consequences of Pleistocene glaciation and recent climate change on the American Pika. *Molecular Ecology*, 21(15), 3757–3775.
- Brun, P., Zimmermann, N. E., Hari, C., Pellissier, L., & Karger, D. N. (2022). CHELSA-BIOCLIM+: A novel set of global climate-related predictors at kilometre-resolution (1.0) [Geotiff, PDF]. *EnviDat*. <https://doi.org/10.16904/ENVIDAT.332>
- Clark Labs. (2022). *TerrSet 2020 Geospatial Monitoring and Modeling Software* [Software]. Clark Labs. <https://clarklabs.org/terrset/>
- Crutzen, P. J. (2006). The “Anthropocene.” In E. Ehlers & T. Krafft (Eds.), *Earth System Science in the Anthropocene* (pp. 13–18). Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/3-540-26590-2_3
- Dolan, A. M., Haywood, A. M., Hunter, S. J., Tindall, J. C., Dowsett, H. J., Hill, D. J., & Pickering, S. J. (2015). Modelling the enigmatic Late Pliocene Glacial Event—Marine Isotope Stage M2. *Global and Planetary Change*, 128, 47–60. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.02.001>
- Dowsett, H. J., Robinson, M. M., Haywood, A. M., Salzmann, U., Hill, D., Sohl, L., Chandler, M., Williams, M., Foley, K., & Stoll, D. K. (2010). The PRISM3D paleoenvironmental reconstruction. *Stratigraphy*, 7(2–3), 123–139. <https://doi.org/10.29041/strat.07.2.03>
- EuroStat. (2024). EuroStat GISCO. EuroStat. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/gisco>
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase

6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937–1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>

Fordham, D. A., Akçakaya, H. R., Alroy, J., Saltré, F., Wigley, T. M., & Brook, B. W. (2016). Predicting and mitigating future biodiversity loss using long-term ecological proxies. *Nature Climate Change*, 6(10), 909–916.

Fordham, D. A., Brook, B. W., Moritz, C., & Nogués-Bravo, D. (2014). Better forecasts of range dynamics using genetic data. *Trends in Ecology & Evolution*, 29(8), 436–443.

Fordham, D. A., Saltré, F., Haythorne, S., Wigley, T. M. L., Otto-Bliesner, B. L., Chan, K. C., & Brook, B. W. (2017). PaleoView: A tool for generating continuous climate projections spanning the last 21,000 years at regional and global scales. *Ecography*, 40(11), 1348–1358. <https://doi.org/10.1111/ecog.03031>

Gradstein, F. M., Ogg, J. G., Schmitz, M. D., & Ogg, G. M. (2020). *Geologic time scale 2020*. Elsevier.

Hausfather, Z. (2018, April 19). Explainer: How ‘Shared Socioeconomic Pathways’ explore future climate change. *CarbonBrief*. <https://www.carbonbrief.org/explainer-how-shared-socioeconomic-pathways-explore-future-climate-change/>

Haywood, A. M., & Valdes, P. J. (2004). Modelling Pliocene warmth: Contribution of atmosphere, oceans and cryosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, 218(3–4), 363–377. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(03\)00685-X](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00685-X)

HCMGIS. (2024, January 12). HCMGIS. *QGIS Python Plugins Repository*. <https://plugins.qgis.org/plugins/HCMGIS/#plugin-versions>

Hill, D. J. (2015). The non-analogue nature of Pliocene temperature gradients. *Earth and Planetary Science Letters*, 425, 232–241. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.05.044>

Karger, D. N., Conrad, O., B  hner, J., Kawohl, T., Kreft, H., Soria-Auza, R. W., Zimmermann, N. E., Linder, H. P., & Kessler, M. (2017). Climatologies at high resolution for the earth’s land surface areas. *Scientific Data*, 4(1), 170122. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.122>

Knowles, L. L., Carstens, B. C., & Keat, M. L. (2007). Coupling genetic and ecological-niche models to examine how past population distributions contribute to divergence. *Current Biology*, 17(11), 940–946.

Legendre, P., & Gallagher, E. D. (2001). Ecologically meaningful transformations for ordination of species data. *Oecologia*, 129, 271–280.

Lunt, D. J., Haywood, A. M., Schmidt, G. A., Salzmann, U., Valdes, P. J., & Dowsett, H. J. (2010). Earth system sensitivity inferred from Pliocene modelling and data. *Nature Geoscience*, 3(1), 60–64. <https://doi.org/10.1038/ngeo706>

Mayewski, P. A., Rohling, E. E., Curt Stager, J., Karl  n, W., Maasch, K. A., Meeker, L. D., Meyerson, E. A., Gasse, F., Van Kreveld, S., Holmgren, K., Lee-Thorp, J., Rosqvist, G., Rack, F., Staubwasser, M., Schneider, R. R., & Steig, E. J. (2004). Holocene climate variability. *Quaternary Research*, 62(3), 243–255. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2004.07.001>

NASA. (2020, February 27). Milankovitch (Orbital) Cycles and Their Role in Earth's Climate. NASA Science. <https://science.nasa.gov/science-research/earth-science/milankovitch-orbital-cycles-and-their-role-in-earths-climate/>

Oksanen, J., Kindt, R., Legendre, P., O'Hara, R. B., Simpson, G. L., Solymos, P., Stevens, M. H. H., & Wagner, H. (2008). The vegan package. *Community ecology package* [Software]. <http://r-forge.r-project.org/projects/vegan/>

Ordóñez, A., & Svenning, J.-C. (2015). Geographic patterns in functional diversity deficits are linked to glacial-interglacial climate stability and accessibility. *Global Ecology and Biogeography*, 24(7), 826–837.

Otto-Bliesner, B. L., Marshall, S. J., Overpeck, J. T., Miller, G. H., Hu, A., & CAPE Last Interglacial Project Members. (2006). Simulating Arctic climate warmth and icefield retreat in the last interglaciation. *Science*, 311(5768), 1751–1753. <https://doi.org/10.1126/science.1120808>

PaleoClim. (2024). PaleoClim methods. *PaleoClim*. <http://www.paleoclim.org/methods/>

Prothero, D. R., & Dott, R. H. (2010). *Evolution of the Earth*. Academia.

R Development Core Team. (2023). *R: A language and environment for statistical computing* [Software]. R Foundation for Statistical Computing. <http://www.r-project.org>

Rosauer, D. F., & Jetz, W. (2015). Phylogenetic endemism in terrestrial mammals. *Global Ecology and Biogeography*, 24(2), 168–179.

Saltré, F., Rodríguez-Rey, M., Brook, B. W., Johnson, C. N., Turney, C. S., Alroy, J., Cooper, A., Beeton, N., Bird, M. I., & Fordham, D. A. (2016). Climate change not to blame for late Quaternary megafauna extinctions in Australia. *Nature Communications*, 7(1), 10511.

Saltzman, B. (2002). *Dynamical paleoclimatology: Generalized theory of global climate change* (Let. 80). Academic Press.

Sandel, B., Arge, L., Dalsgaard, B., Davies, R. G., Gaston, K. J., Sutherland, W. J., & Svenning, J.-C. (2011). The influence of Late Quaternary climate-change velocity on species endemism. *Science*, 334(6056), 660–664.

Scherrer, D., & Koerner, C. (2009). Infra-red thermometry of alpine landscapes challenges climatic warming projections. *Global Change Biology*, 16(9), 2602–2613.

Shokry, G., Anguelovski, I., Connolly, J. J. T., Maroko, A., & Pearsall, H. (2022). "They didn't see it coming": Green resilience planning and vulnerability to future climate gentrification. *Housing Policy Debate*, 32(1), 211–245. <https://doi.org/10.1080/10511482.2021.1944269>

Summerhayes, C. P., & Zalasiewicz, J. (2018). Global warming and the Anthropocene. *Geology Today*, 34(5), 194–200. <https://doi.org/10.1111/gto.12247>

Van Daalen, K. R., Romanello, M., Rocklöv, J., Semenza, J. C., Tonne, C., Markandya, A., Dasandi, N., Jankin, S., Achebak, H., Ballester, J., Bechara, H., Callaghan, M. W., Chambers, J., Dasgupta, S., Drummond, P., Farooq, Z.,

Gasparyan, O., Gonzalez-Reviriego, N., Hamilton, I., ... Lowe, R. (2022). The 2022 Europe report of the Lancet Countdown on health and climate change: Towards a climate resilient future. *The Lancet Public Health*, 7(11), e942–e965.
[https://doi.org/10.1016/S2468-2667\(22\)00197-9](https://doi.org/10.1016/S2468-2667(22)00197-9)

Summary

The historical evolution of paleo-climate is an important driver of recent biodiversity patterns. Numerous ecological modelling studies have confirmed the high informative power of paleo-climate indicators or data. Paleo-climate reconstructions are commonly combined with environmental and genetic data to infer the effects of past climate change on species richness, endemism, phylogenetic and functional diversity. They are also used to research and test hypotheses about the dynamics of species migration and extinction, and to develop strategies to mitigate biodiversity loss owing to anthropogenically-accelerated climate change. Consequently, there is a strong drive to increase the temporal and spatial resolution of paleo-climate data (and indicators) suitable for detecting ecological and evolutionary responses to past climate change. Until recently, the limited availability of accessible climate data for time periods other than the Middle Holocene (6.000 years ago), the Last Glacial Maximum (LGM, 21.000 years ago), or the Last Interglacial (130.000 years ago) was a major obstacle. A step forward in this field are the data provided by the PaleoClim team, that are based on complex mathematical global climate models (HadCM3 and GCM). By adding freely available (identical) climate data (indicators) for the recent period (1979-2013) and the future (CMIP6 protocol) from the CHELSA database, we can determine and evaluate the spatial similarity/difference of past (natural) and future (natural + anthropogenic) climate changes.

Thus, based on our results, we conclude that in the study area, from the perspective of variables average annual air temperature (in °C*10) [bio1] and average annual precipitation (in mm) [bio12], the most stable areas were the mountainous regions. Scherrer and Körner (2009) stated that organisms in the mountains are generally better off than those in the lowland belt when environmental conditions change, as the specific topography offers a mosaic of alternative microhabitats over short distances. Therefore, it is not surprising that mountains have always been a refuge area for many plant and animal species in the changing climate. According to the change magnitude indicator, from the perspective of variables bio1 and bio12, in the research area, chrono-sequences 1_2 (Pliocene stage M2 [3.3 Mya] – mid Pliocene warm period [3.205 Mya]), 2_3 (mid Pliocene warm period [3.205 Mya] – Pliocene stage MIS19 [787 Kya]) and 9_10 (Early Holocene [11.7-8.3 Kya] – Middle Holocene [8.3-4.2 Kya]). Estimates of changes in temperature and precipitation conditions for the end of the 21st century, according to the pessimistic scenario SSP5-8.5, are lower in magnitude compared to past periods, on average (in most cases), but with significant regional differences. Thus, the predicted spatial pattern of climate change of the chrono-sequences 12_13(1) and 12_13(2) is in the second, third or fifth place in terms of contribution to the differences between the areas formed by the countries in group 1, 2 or 3. The latter illustrates the comparability of future climate changes, in the wider European area, with the intensity of those from the Pliocene period (5.2 to 2.6 million years ago). Analysis and comparison of chrono-sequences of climate change direction, from the temperature and precipitation conditions perspectives, confirmed high climate condition variability in the European area in the last three million years. Cooling and decreasing or increasing humidity during ice ages and warming of the atmosphere and decreasing or increasing of precipitation during interglacial periods. Pessimistic forecasts for the end of the 21st century show a clear direction of warming and drying (mainly in the Mediterranean) or warming and increasing humidity in the higher latitudes of the European area. It is a spatial trend that is also recognizable in chrono-sequences 8_9 (Pleistocene stage *Younger Dryas* [12.9-11.7 Kya] - early-Holocene [11.700-8.3 Kya]), 9_10 (early-Holocene [11.7-8,3

Kya] - middle-Holocene [8.3-4.2 Kya]), 10_11 (middle-Holocene [8.3-4.2 Kya] - late-Holocene [4.2-0.3 Kya]) and 11_12 (late-Holocene [4.2-0.3 Kya] - present (Anthropocene) [1979-2013]). Also from the climate change direction perspective, significant regional differences in the considered chrono-sequences emerged. We can form three groups of countries, which are characteristically different in terms of the dynamics of changes in temperature and precipitation conditions but are at the same time similar within the group. Chrono-sequences 5_6 (Last Glacial Maximum [21 Kya] - Pleistocene stage Heinrich [17 -14.7 Kya]), 7_8 (Pleistocene stage *Bølling-Allerød* [14.7-12.9 Kya] - Pleistocene stage *Younger Dryas* [12,900-11,700 years ago]) and 11_12 (late-Holocene [4.2-0.3 Kya] - present-Anthropocene [1979-2013]) contributed the most to the differences between the groups. In future estimates of the considered global climate models (MPI-ESM1-2-HR and IPSL-CM6A-LR), the European area will/could warm (with the exception of the Alpine highlands and the Scandinavian mountains). It will/could become drier in some places (group 3 countries) and wetter in others (group 2 countries).

