

**DRŽAVNI HIDROMETEOROLOŠKI ZAVOD**  
**SEKTOR ZA METEOROLOŠKA ISTRAŽIVANJA I RAZVOJ**  
**Služba za klimatologiju**

***Interpretacija analize klimatskih promjena za planske  
potrebe upravljanja vodama***



**Zagreb, kolovoz 2019.**

Dokument je izrađen temeljem Ugovora o uslugama Povijesni meteorološki podaci KLASA: 325-01/18-10/23, URBROJ: 374-1-2-18-10 od 14.08.2018. godine (Evid.broj Ugovora 10-045/18) za potrebe HRVATSKIH VODA (OIB 28921383001) kao naručitelja od izvršitelja DRŽAVNOG HIDROMETEOROLOŠKOG ZAVODA (OIB 74660937164). Izrađen je u Državnom hidrometeorološkom zavodu, u Sektoru za meteorološka istraživanja i razvoj, u Službi za klimatologiju.

Stručna analiza i interpretacija:	mr. sc. Lidija Srnec
Statistička analiza i vizualizacija:	Goran Gašparac, mag. phys.-geophys.
Stručna analiza i interpretacija:	dr. sc. Ivan Güttler

Voditeljica Službe za klimatologiju:

R A V N A T E L J I C A:

mr. sc. Melita Perčec Tadić

dr. sc. Branka Ivančan-Picek

<b>1. Uvod</b>	<b>1</b>
<b>2. Metodologija</b>	<b>3</b>
<b>3. Rezultati i diskusija</b>	<b>11</b>
3.1 Prostorni prikaz polja klimatskih projekcija	11
3.2 Prostorni srednjaci za područja odabranih slivova	20
3.3 Maksimalna dnevna količina oborine za zadana povratna razdoblja	37
3.4 Dodatni parametri: srednja razina mora i brzina vjetra na 10 m	51
<b>4. Zaključak</b>	<b>54</b>
Aktivnosti koje će adresirati ograničenja u metodologiji primijenjenoj u ovoj studiji	56
Aktivnosti koje će proširiti metodologiju primijenjenu u ovoj studiji	58
<b>Izvori podataka i zahvale</b>	<b>60</b>
<b>Popis skraćenica</b>	<b>61</b>
<b>Dodatak</b>	<b>62</b>
<b>Literatura</b>	<b>63</b>

# 1. Uvod

Cilj ovog izvješća je predstaviti i interpretirati rezultate regionalnih klimatskih simulacija na području Republike Hrvatske za planske potrebe upravljanja vodama. Za ovu potrebu korišteni izvori klimatskih simulacija su:

1. rezultati dobiveni za potrebe izrade *Nacrta Strategije prilagodbe klimatskim promjenama u Republici Hrvatskoj za razdoblje do 2040. godine s pogledom na 2070. godinu* (MZOE, 2017; model RegCM4).
2. rezultati dostupni kroz međunarodnu inicijativu EURO-CORDEX (Jacob i sur. 2014, Kotlarski i sur. 2014; modeli RCA4 i CCLM).

Prostorna rezolucija korištenih regionalnih klimatskih modela (RCM) je 12.5 km, čime je osigurano realistično uvažavanje osnovnih prostornih karakteristika na čitavom području Europe. Vremenski fokus analize je razdoblje od 1971. do 2070. Rubni uvjeti RCM-ovima čine rezultati globalnih klimatskih modela (GCM), u ovom slučaju rezultati četiri CMIP5 GCM-a. Za razdoblje od 1971. do 2005. korištene su izmjerene vrijednosti koncentracija stakleničkih plinova, dok za razdoblje od 2006. do 2070. tzv. RCP scenariji koncentracija (RCP8.5 i RCP4.5). Jednu specifičnu projekciju buduće klime čini kombinacija jednog RCM (od 3 odabrana u ovoj analizi), jednog GCM (od 4 odabrana u ovoj analizi) i jednog scenarija (od 2 odabrana u ovoj analizi). U konačnici analiziramo 12 simulacija povijesne klime te 24 simulacije buduće klime.

Regionalni klimatski modeli su moderan istraživački alat čiji je razvoj započeo krajem 80.-tih godina prošlog stoljeća (npr. Giorgi i Mearns 1991, Laprise i sur. 2008, Rummukainen 2010, Prein i sur. 2015, Rummukainen 2016, Giorgi 2019). Nekoliko osnovnih postavki u simulacijama korištenim u ovoj studiji uključuje:

1. Primijenjena prostorna rezolucija od 12.5 km omogućava predstavljanje osnovnih topografskih karakteristika te osnovnu strukturu granice kopno-more. Osim 2D prikaza simuliranih polja, u izvješću se daje pregled prostorno usrednjenih polja na širem području Republike Hrvatske te na odabranim slivovima.
2. Ovdje korišteni globalni i regionalni klimatski modeli uzimaju u obzir realistične vrijednosti koncentracija stakleničkih plinova u povijesnom razdoblju (1971.-2005.)

te dva moguća scenarija za buduću klimu (RCP4.5 i RCP8.5). Riječ je tzv. umjerenom i ekstremnom scenariju, između kojih se veće razlike očekuju od sredine 21. stoljeća. Bitno je naglasiti da se u ova dva scenarija ne može očekivati zaustavljanje globalnog zagrijavanja na vrijednosti ispod 1.5 °C. Također, ovdje korišteni RCM i GCM te scenariji uzimaju u obzir osnovne karakteristike čestica aerosola u atmosferi te izostanak realističnije klimatologije i mogućih scenarija aerosola unosi malu do umjerenu nepouzdanost u prikazane rezultate koju će biti potrebno adresirati u budućim istraživanjima..

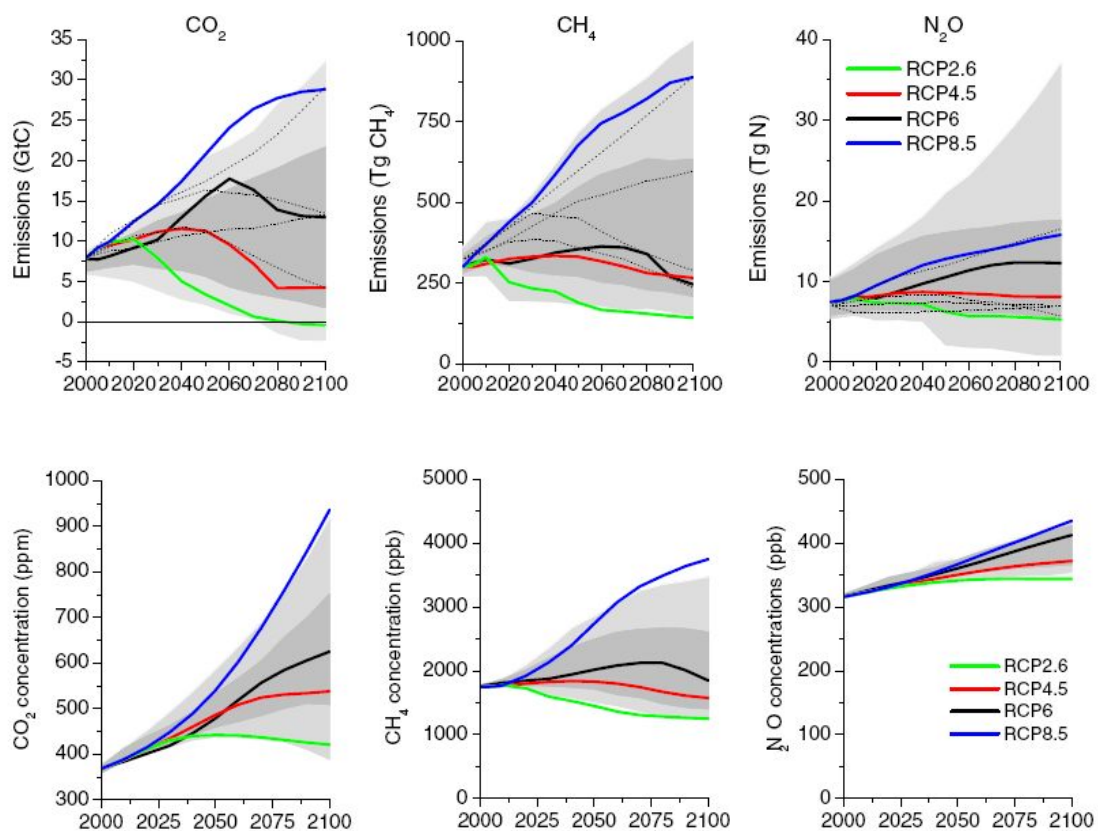
3. Korištenje tri regionalna i četiri globalna klimatska modela uzima u obzir rasap u simuliranju klimatskog sustava povezan s formulacijom klimatskog modela i odabirom specifičnih pretpostavki (posebno u parametriziranju nerazlučenih procesa kao što su konvektivni proces i mikrofizika oblaka). Prednost ovdje korištenog pristupa je popunjena matrica kombinacija gdje su sva tri odabrana regionalna modela odvojeno forsirana sa svakim od odabrana četiri globalna klimatska modela. Korištenje više modela je preporučeni pristup kako bi se izbjegla ovisnost o pretpostavkama i detaljima implementacije samo jednog modela. Ovo za posljedicu u analizi rezultata ima mogućnost iskazivanja raspona simuliranih signala klimatskih promjena.
4. Ovdje korišteni modeli se mogu usporediti s mjerenjima u smislu srednje klime (ne u smislu simulacije pojedinog vremenskog događaja, mjeseca, sezone ili godine). Simulacije buduće klime se trebaju interpretirati kao projekcije ovisne o zadanim rubnim uvjetima. Projekcije imaju za cilj dati procjene raspona i trendova mogućih promjena kroz dulje razdoblje.

## 2. Metodologija

U ovom dijelu izvješća dane su informacije vezane za ugovornu obvezu: *Opisati i interpretirati, s vodnogospodarskog stajališta, sve bitne aspekte korištenog klimatskog modela za analizu klimatskih promjena i njegovih rezultata*

Varijable bitne za vodnogospodarski sektor temperatura zraka na 2 m, ukupna količina oborine, evapotranspiracija i ukupno otjecanje, analizirane u ovoj studiji dobivene su kao direktni izlaz iz simulacija regionalnih klimatskih modela. Korištena je temperatura zraka na 2 m kao srednja dnevna temperatura, ukupnu količinu oborine čini dnevna količina oborine dobivena iz tekuće (kiša) i krute (snijeg) faze, evapotranspiracija je rezultat sheme za procese u tlu i na površini modela koja se primjenjuje unutar svake računске ćelije regionalnih klimatskih modela. Posljednja analizirana varijabla, ukupno otjecanje, se u modelima javlja u slučaju djelomične ili potpune zasićenosti tla vodom, te korišteni modeli bilježe procjenu tako dobivenih količina vode. Također, korišteni modeli ne simuliraju protoke rijeka te su bitno ograničeni u svojoj mogućnosti da realno opišu neke od dijelova hidrološkog ciklusa u složenim i osjetljivim područjima kao što je krš. Iz tog razloga rezultati za ukupno otjecanje u ovoj studiji trebaju biti uzeti kao okvirni za šire prostorno područje te će ukupno otjecanje biti potrebno dodatno analizirati u budućim istraživanjima.

Tri regionalna klimatska modela forsirana su pomoću četiri globalna klimatska modela. Projekcije buduće klime rađene su pod pretpostavkom dva buduća IPCC-jeva scenarija, RCP4.5 i RCP8.5 (van Vuuren i sur. 2011). RCP4.5 scenarij, tzv. umjereni scenarij pretpostavlja da će se od sredine do kraja 21. stoljeća emisija stakleničkih plinova smanjivati. Kako staklenički plinovi imaju relativno dugi životni vijek u atmosferi, njihova bi koncentracija od sredine do kraja stoljeća ostala nepromijenjena. Na taj način bi se porast temperature uzrokovan rastom koncentracija stakleničkih plinova zaustavio na razini porasta temperature od sredine stoljeća. RCP8.5 scenarij daje porast emisija stakleničkih plinova do kraja 21. stoljeća. Zbog toga se uz ovaj scenarij do kraja stoljeća očekuje značajno veći porast temperature zraka. Vremenski nizovi emisija i koncentracija plinova CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> i N<sub>2</sub>O u oba RCP scenarija do kraja 21. stoljeća prikazani su na Slici 2.1.



**Slika 2.1** Prvi red: emisije stakleničkih plinova CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> i N<sub>2</sub>O u RCP scenarijima do kraja 21. stoljeća. Drugi red: koncentracije istih plinova. RCP4.5: crvena linija; RCP8.5: plava linija. Izvor: van Vuuren i sur. (2011; njihova Slika 6 i Slika 9).

Globalni modeli čiji su podaci korišteni kao rubni uvjeti regionalnih klimatskih modela su:

- (1) MPI-ESM-LR/MPI-ESM-MR  
(<http://www.mpimet.mpg.de/en/science/models/mpi-esm/>)
- (2) EC-EARTH (<http://www.ec-earth.org/about/>)
- (3) CNRM-CM5 (<http://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article126&lang=en> )
- (4) HadGEM2-ES  
(<https://www.metoffice.gov.uk/research/modelling-systems/unified-model/climate-models/hadgem2>)

Iz EURO-CORDEX baze korišteni su podaci dva regionalna klimatska modela:

- (1) RCA4  
(<https://www.smhi.se/en/research/research-departments/climate-research-rossby-centre2-552/rossby-centre-regional-atmospheric-model-rca4-1.16562> )
- (2) CCLM4 (<https://www.clm-community.eu/index.php?menuid=99&reporeid=288> )

Podaci dobiveni trećim modelom rezultat su simulacija tijekom izrade *Strategije prilagodbe klimatskim promjenama Republike Hrvatske do 2040. i s pogledom na 2070.*

(3) RegCM4 (<https://www.ictp.it/research/esp/models/regcm4.aspx> ). Ovi rezultati projekcija obavljeni za potrebe izrade navedene strategije su rezultat do sada najvećeg tehničkog i stručnog napora obavljenog od strane stručnjaka Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ) zajedno u suradnji i tehničkoj pomoći od strane stručnjaka Sveučilišnog računalnog centra (Srce). Tehnička izvješća temeljena na rezultatima simulacija na 50 km i 12.5 km su dostupna na web stranicama Ministarstva zaštite okoliša i energetike:

<http://prilagodba-klimi.hr/wp-content/uploads/2019/05/Rezultati-klimatskog-modeliranja-na-sustavu-HPC-Velebit.pdf>

[http://prilagodba-klimi.hr/wp-content/uploads/2019/05/Dodatak\\_Klimatsko\\_modeliranje\\_VELEbit\\_12.5km.pdf](http://prilagodba-klimi.hr/wp-content/uploads/2019/05/Dodatak_Klimatsko_modeliranje_VELEbit_12.5km.pdf)

Za potrebe ove studije, RegCM4 skup simulacija je dodatno proširen modelima opisanim u točkama (1) i (2) te su uvedene detaljnije analize od interesa u području vodnog gospodarstva.

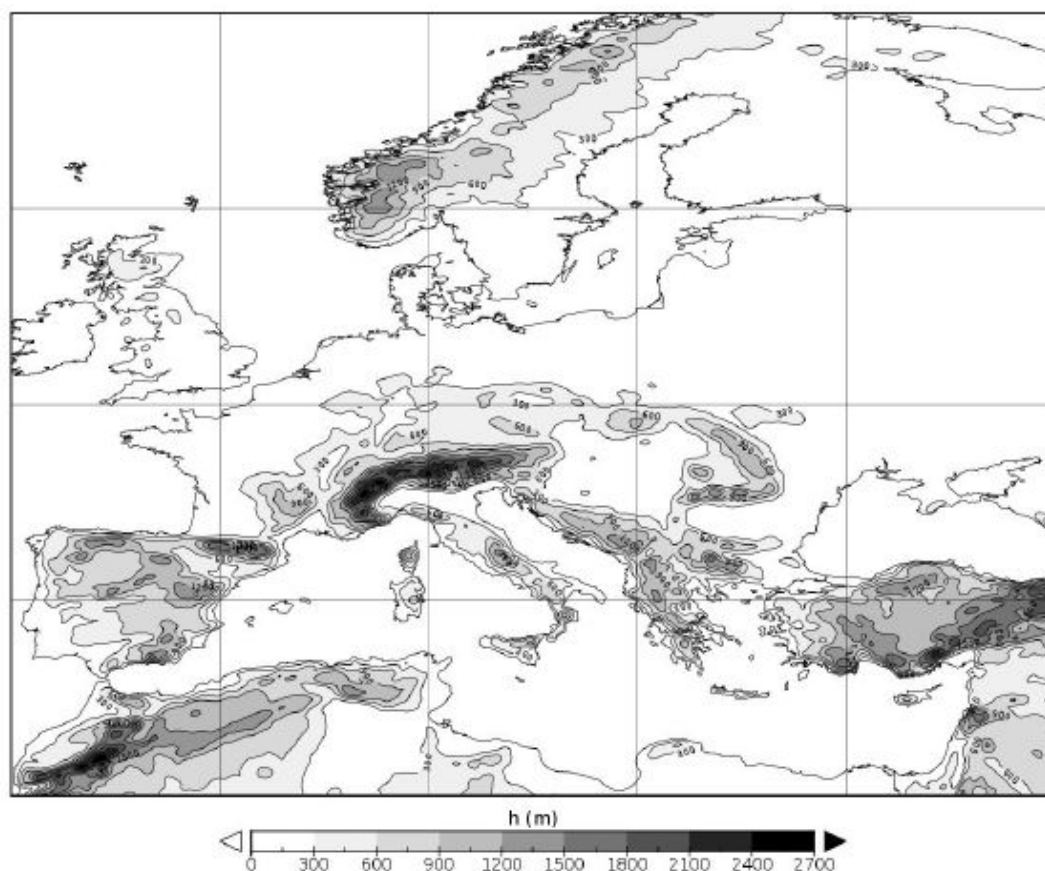
Osnovne karakteristike regionalnih klimatskih modela dane su u Tablici 2.1 a primjer visine orografije iz modela RegCM4 na Slici 2.2. Daljnja interpretacija analize klimatskih promjena za planske potrebe upravljanja vodama izrađena je na pod-domeni klimatskih modela (u daljnjem tekstu, domeni) te podslivovima rijeka Drave i Dunava, Save te Jadranskog vodnog područja prikazanim na Slici 2.2. Podaci su interpretirani sa mreže modela prikazane na Slici 2.3.

**Tablica 2.1** Osnovne karakteristike korištenih regionalnih klimatskih modela.

	RCA4	CCLM5	RegCM4
Institucija/mreža	SMHI	CLMCOM	DHMZ
Broj vertikalnih nivoa	40	40	23
Atmosferski granični sloj	Cuxart i sur. 2000	Louis 1979	Holtslag i sur. 1990
Konvekcija	Kain i Fritsch 1990,	Tiedtke 1989	Grell 1993

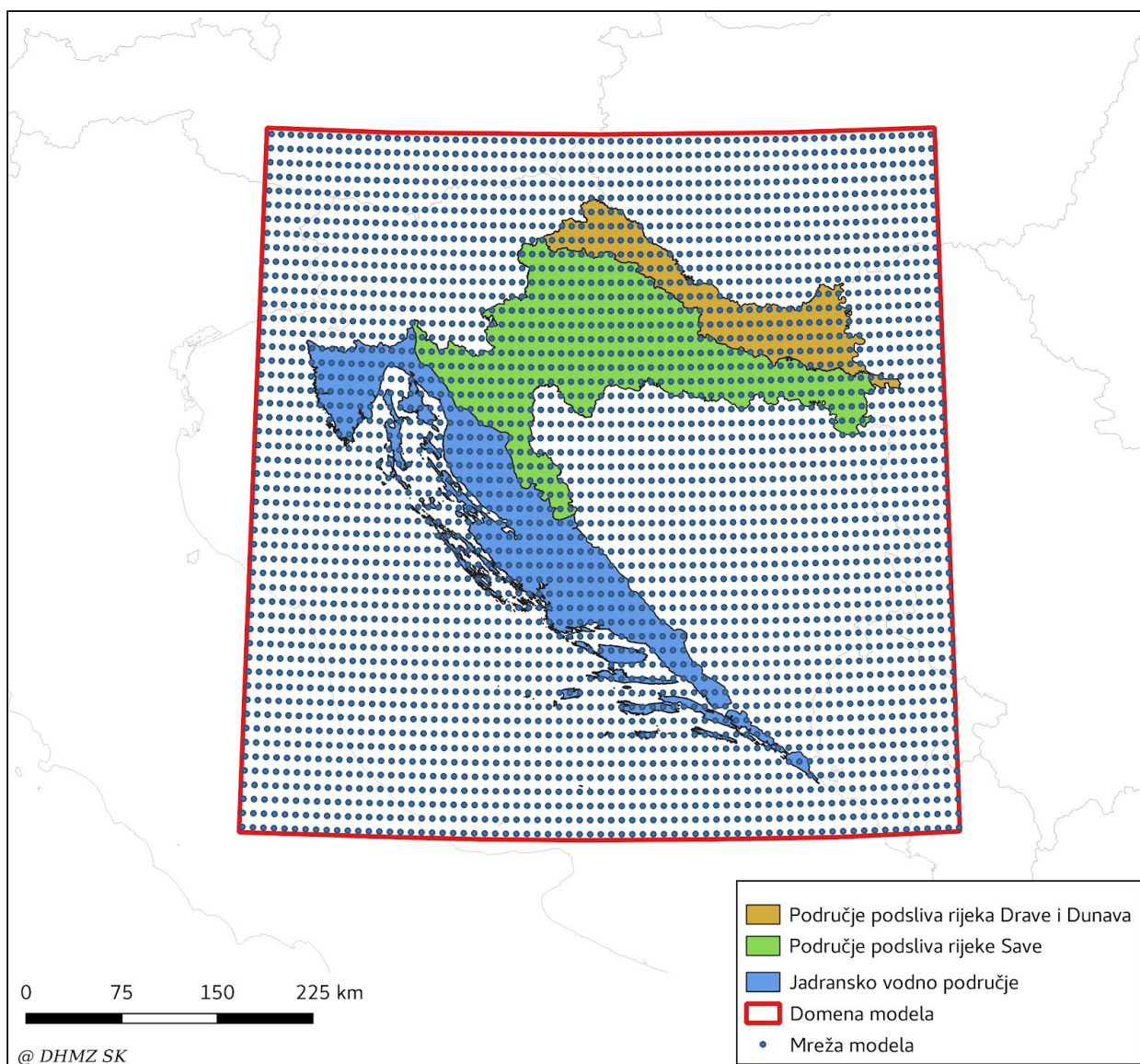


	1993; Kain 2004; Jones i Sanchez 2002		
Mikrofizika oborine	Rasch i Kristijansson 1998	Doms i sur. 2007; Baldauf i Schultz 2004	Pal i sur. 2000
Zračenje	Savijärvi 1990; Sass i sur. 1994	Ritter i Geleyn 1992	Kiehl i sur. 1996
Procesi na površini i u tlu	Samuelsson i sur. 2006	TERRA-ML Doms i sur. 2007	Dickinson i sur. 1993 <sup>1</sup>



**Slika 2.2** Orografija u regionalnom klimatskom modelu RegCM4, prostorna rezolucija je 12.5 km.

<sup>1</sup> Direktni pristup opisu tzv. BATS scheme je dostupan na poveznici:  
<http://opensky.ucar.edu/islandora/object/technotes:154>



**Slika 2.3** Poddomena (u nastavku, domena) klimatskih modela (crveni kvadrat) sa označenim područjima: područje podsliva rijeka Drave i Dunava (smeđi poligon), područje podsliva rijeke Save (zeleni poligon), Jadransko vodno područje (plavi poligon) te mrežom modela (plavi kružići).

Prikaz rezultata je organiziran na sljedeći način:

1. Prostorna polja odabranih varijabli uključuju prikaz medijana od dostupnih 12 simulacija: za svaki model posebno je određen u svakoj točki domene srednjak kroz 30 godina (P0: 1971.-2000.) te se medijan određuje na temelju tako dobivenih 12 vrijednosti.
2. Isti pristup kao u 1. primjenjuje se za buduća razdoblja (P1: 2011.-2040. te P2: 2041.-2070.). Grafički prikaz uključuje razliku između P1 i P0 (tj. P2 i P0) za slučaj temperature zraka, odnosno relativnu razliku u odnosu na P0 za ostale tri varijable.

Prikaz se odvojeno daje za svako godišnje doba (klimatski definirano) te odvojeno za dva RCP scenarija.

3. Rezultati u nastavku uključuju prikaz za svaki model odvojeno (y-os) i pojedinačan mjesec (x-os) razliku između 30 godišnjih srednjaka. Prikaz se također razlaže odvojeno za dva RCP scenarija, za dva buduća razdoblja te su prikazane relativne razlike za sve varijable osim temperature zraka. Dodatno, grafički prikaz sadrži numeričku vrijednost srednjaka i medijana 12 modela tijekom P0 razdoblja ("Ref. mean" i "Ref. medijan") te numeričku vrijednost srednjaka na temelju 12 odvojenih razlika između budućih razdoblja i povijesnog razdoblja ("Ens. mean change").
4. Konačno, vrijednosti maksimalne godišnje i sezonske (DJF (zima), MAM (proljeće), JJA (ljetno) i SON (jesen)) količine oborine izračunata su za povratna razdoblja od 10, 20, 50, 100, 200, 500 i 1000 godina pomoću opće razdiobe ekstremnih vrijednosti (GEV - Generalised Extreme Value Theory) koristeći `gevfit`<sup>2</sup> paket Octave programskog jezika. Metoda se temelji na ulaznom nizu dnevnih količina oborine. U prvom koraku se za svaku godinu i sezonu određuju maksimalne vrijednosti. U nastavku se za nizu od npr. 30 maksimalnih dnevnih količina oborine unutar razdoblja P0 (1971.-2000.) prilagođava opća razdioba ekstremnih vrijednosti (GEV, Jenkinson 1955) iz koje je moguće odrediti vrijednost količine oborine za zadano povratno razdoblje. GEV razdioba se određuje u svakoj točki modela za svaki od 12 kombinacija RCM i GCM odvojeno te unutar tri zadana razdoblja (P0, P1 i P2) odvojeno za dva emisijska scenarija (RCP4.5 i RCP8.5). Prikaz rezultata uključuje puna polja ekstremnih količina oborine za zadana povratna razdoblja te signal klimatskih promjena. U svim slučajevima razmatra se informacija na razini čitavog ansambla tj. skupa simulacija.

---

<sup>2</sup> <https://octave.sourceforge.io/statistics/function/gevfit.html>

U ovom dijelu izvješća dane su informacije vezane za ugovornu obvezu: *Procijeniti usklađenost i mogućnost usporedbe i praćenja rezultata klimatskog modela uz korištenje podataka/produkata zasnovanih na mjerenim podacima te predložiti metode za analize u te svrhe*

Osnovno ograničenje klimatskih modela je mogućnost odstupanja od izmjerenih vrijednosti. Ovo je karakteristika svih klimatskih modela a rješava se razvojem klimatskih modela (npr. povećanje prostorne rezolucije, uvođenje dodatnih procesa i razvojem pojedinih dijelova modela). U slučaju regionalnih klimatskih modela forsiranih globalnim klimatskim modelima, odstupanja se mogu analizirati na razini srednje klimatologije (npr. srednjak 20 ili 30 godina iz modela vs. srednjak izmjerenih vrijednosti)<sup>3</sup>. Kao izvor mjerenih podataka, mogu se koristiti višegodišnji nizovi dostupni s mjernih postaja te u novije vrijeme polja dostupna na pravilnoj mreži dobivena geostatističkim metodama interpolacije i/ili obrađena satelitska i radarska mjerenja. Temperatura zraka na 2 m i ukupna količina oborine iz EURO-CORDEX regionalnih klimatskih modela (uključujući RCA4 i CCLM) detaljno je analizirana je u odnosu na E-OBS mjerenja (stanična mjerenja interpolirana na pravilnu mrežu) u Kotlarski i sur. (2014). Također, rezultati DHMZ RegCM4 simulacija su usporedivom metodologijom analizirani u Güttler i sur. (*u recenziji*). Generalno, uspješnost modela varira od modela do modela te je funkcija:

- (1) analiziranog područja (npr. sliva u ovoj studiji),
- (2) doba godine i analiziranog razdoblja,
- (3) analizirane varijable,
- (4) korištene mjere za usporedbu.

Osrednjeno preko većih geografskih područja, srednje pogreške temperature zraka na 2 m su tipično u rasponu od -1.5 °C do 1.5 °C a srednje pogreške ukupne količine oborine od -40 % do 40 % (Kotlarski i sur. 2014). Ovisno o lokaciji i modelu, moguće su sustavne pogreške bitno manje amplitude što je potrebno provjeriti i analizirati od slučaja do slučaja. Kako bi se izbjegla ovisnost o ograničenjima unutar samo jednog regionalnog klimatskog modela, preporuča se korištenje skupa (ansambla) regionalnih klimatskih modela. Korištenjem relativno velikog skupa od 12 kombinacija regionalnih i globalnih klimatskih modela u ovoj studiji su adresirane sustavne pogreške te je bitno smanjena ovisnost o pretpostavkama i aproksimacijama unutar pojedinačnih kombinacija regionalnih i globalnih klimatskih modela. U preporukama budućih aktivnosti bit će izloženi dodatni prijedlozi za

---

<sup>3</sup> U slučaju regionalnih klimatskih modela forsiranih reanalizom, za očekivati je određena uspješnost modela u simuliranju pojedinog događaja, mjeseca, sezone ili godine.

buduća istraživanja i naprednu primjenu klimatskih modela u području vodnog gospodarstva.

## 3. Rezultati i diskusija

### 3.1 Prostorni prikaz polja klimatskih projekcija

U ovom su poglavlju analizirane prostorne promjene varijabli iznad proširenog područja Republike Hrvatske (u tekstu dalje Domena). Promjene su promatrane po sezonama, pri čemu su one definirane na sljedeći način:

- zima (DJF): prosinac-siječanj-veljača,
- proljeće (MAM): ožujak-travanj-svibanj,
- ljeto (JJA): lipanj-srpanj-kolovoz,
- jesen (SON): rujan-listopad-studen.

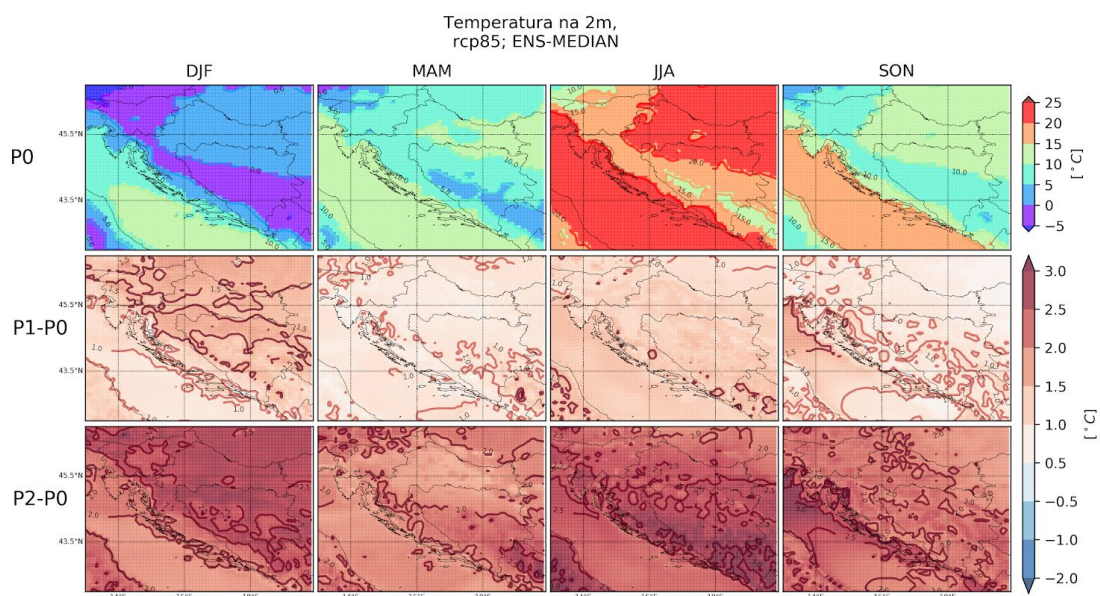
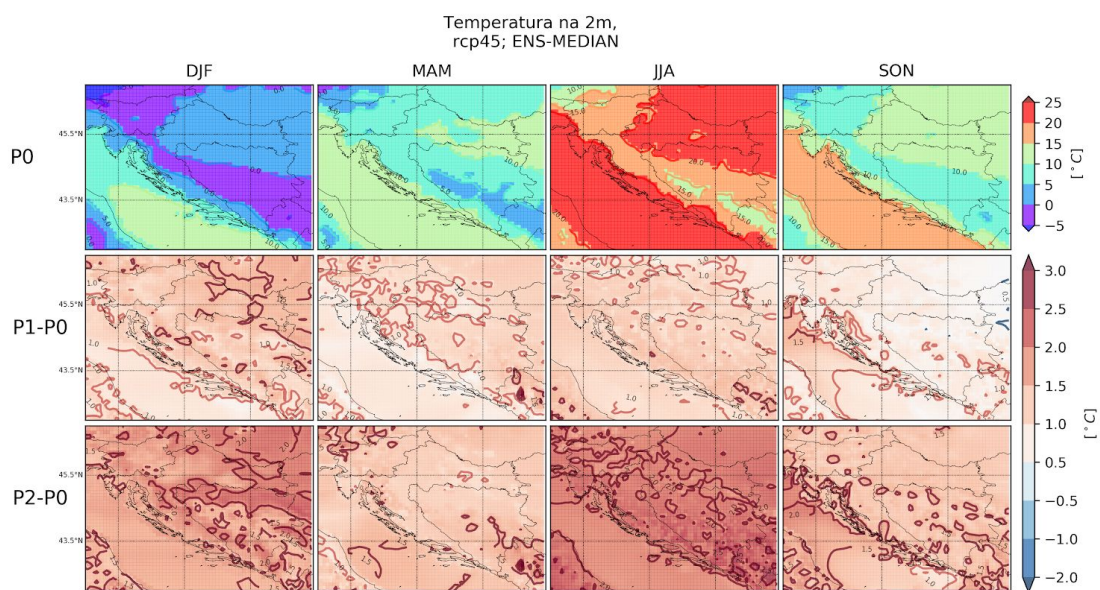
Svaka se slika sastoji od prikaza medijana ansambla varijable u sadašnjoj klimi P0 (definirana je razdobljem 1971.-2000.) - prvi red, medijana ansambla promjene varijable u bliskom budućem razdoblju u odnosu na sadašnju klimu P1-P0 (P1 je definirano razdobljem 2011.-2040.) - drugi red i medijana ansambla promjene varijable sredinom 21. stoljeća u odnosu na sadašnju klimu P2-P0 (P2 je definirano razdobljem 2041.-2070.) - treći red. Kako u studiji promatramo dva moguća scenarija razvoja emisija i koncentracija stakleničkih plinova, za svaku su varijablu prikazane promjene za RCP4.5 i RCP8.5 scenarij. Buduće promjene oborine, evapotranspiracije i otjecanja su prikazane u postocima u odnosu na sadašnju klimu, za razliku od promjene temperature koja je definirana razlikom između budućeg i sadašnjeg razdoblja. Pojam "sadašnja klima" u tekstu se odnosi na klimu koja je također dobivena simulacijom regionalnih klimatskih modela i ne predstavlja stvarno mjerene podatke.

Medijan ansambla svih kombinacija regionalnih i globalnih klimatskih modela ukazuje da temperatura zraka zimi poprima vrijednosti između 0 i 5 °C u unutrašnjosti kontinentalnog dijela Hrvatske te priobalja i unutrašnjosti Istre (Slika 3.1.1). Planinski dio ima temperature u rasponu od -5 do 0 °C, dok je na obali i otocima temperatura zraka između 5 i 10 °C. U proljeće u većem dijelu zemlje prevladavaju temperature između 5 i 10 °C. Između 10 i 15 °C je u istočnom dijelu ravničarske Hrvatske te uz obalu. Medijan ansambla ljetne temperature ukazuje na temperature između 20 i 25 °C u nizinskom dijelu kontinentalne Hrvatske, u Istri, na Jadranu i njegovoj unutrašnjosti, dok je temperatura

zraka na području Gorskog kotara i Like, te na manjim dijelovima gorja u unutrašnjosti zemlje između 15 i 20 °C. U jesen nizinski dio Hrvatske, Istra i unutrašnjost obale imaju temperature zraka između 10 i 15 °C, uz obalu 15 i 20 °C, dok su u gorskom dijelu Hrvatske koji razdvaja obalu od unutrašnjosti zemlje temperature u rasponu 5 i 10 °C. Detaljnije informacije o simuliranim temperaturama moći će se iščitati iz datoteka u prilogu.

Prema scenariju RCP4.5 u razdoblju 2011.-2040. (P1) očekuje se porast temperature zraka u medijanu ansambla u svim sezonama. U odnosu na P0, najmanji se porast očekuje u jesen i proljeće (0.5 do 1° C), zatim ljeti oko 1 °C, te zimi do 1.5 °C. Sredinom stoljeća, u razdoblju 2041.-2070. porast temperature će u svim sezonama biti nešto izraženiji u odnosu na razdoblje P1. Najveći se porast očekuje ljeti oko 2 °C, zimi 1.5 do 2 °C, u jesen oko 1.5 °C i u proljeće 1 do 1.5°C

RCP8.5 scenarij za P1 daje najmanji porast temperature zraka u proljeće, uglavnom 0.5 do 1 °C, u jesen oko 1 °C, ljeto 1 do 1.5 °C, a zimi oko 1.5 °C. U P2 razdoblju su amplitude nešto veće nego u P1, pa zagrijavanje iznosi oko 2 °C u proljeće, 2 do 2.5 °C u jesen, 2.5 do 3 °C u ljeto i do 3 °C u zimi.



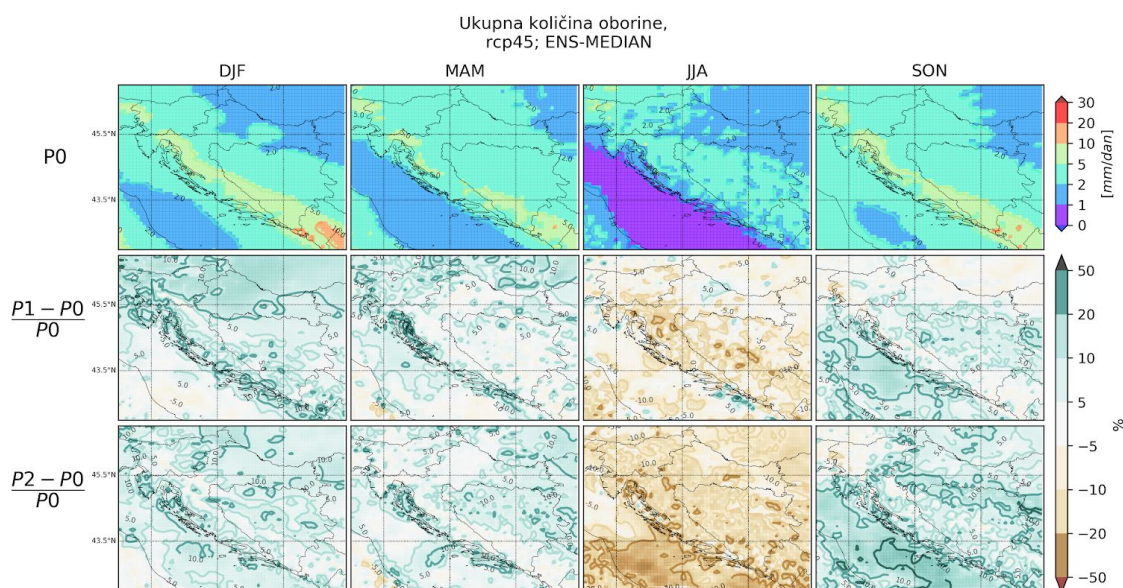
**Slika 3.1.1** Medijan ansambla temperature zraka na 2 m (u °C) iznad cijele domene iz EURO-CORDEX projekcija u sadašnjoj klimi P0 (1971.-2000.) prvi red, promjena u bliskoj budućnosti P1-P0 razdoblju drugi red i sredinom stoljeća P2-P0 treći red za RCP4.5 scenarij (gornja slika) i RCP8.5 (donja slika). Rezultati su prikazani za svaku sezonu odvojeno (stupci s lijeva na desno).



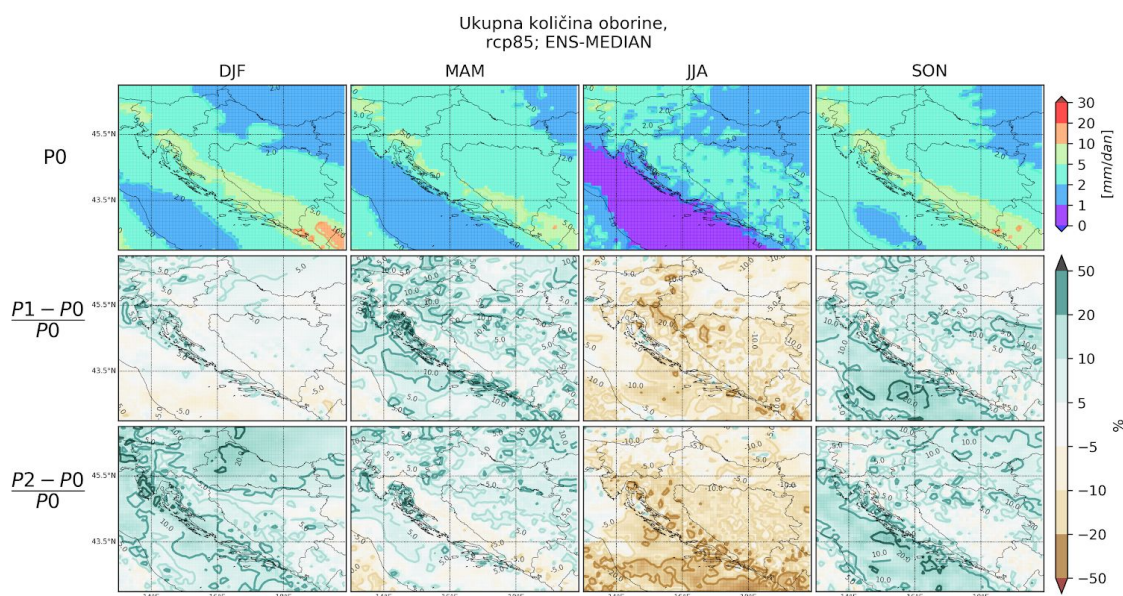
Medijan ansambla ukupne sezonske količine oborine (Slika 3.1.2) pokazuje da zimi modeli daju najmanje oborine u sjeverozapadnom i istočnom dijelu Hrvatske (1-2 mm/dan), dok je u većem dijelu zemlje ukupna količina oborine u rasponu 2-5 mm/dan. Uz planinski dio Dinarida, ukupna količina oborine zimi je 5-10 mm/dan. U proljeće je na većem dijelu Hrvatske ukupna simulirana oborina 2-5 mm/dan, na najvišim vrhovima planinskog lanca 5-10 mm/dan, uz obalu Jadrana do 2 mm/dan. Oborinski režim u jesen ima sličnu prostornu raspodjelu kao zimski, uz oborine od 1-2 mm/dan više zastupljene na krajnjem istoku, te nešto uži pojas najvećih jesenskih količina oborine duž planinskog lanca. Ljeti je ukupna količina oborine 1-2 mm/dan u središnjoj i istočnoj Hrvatskoj i u unutrašnjosti obale, 2-5 mm/dan južnije od Save, do 1 mm/dan uz obalu i na otocima.

Promjena oborinskog režima u P1 uz RCP4.5 scenarij daje blago povećanje oborine u svim sezonama osim ljeti. Promjene su u najvećem dijelu Hrvatske unutar raspona  $\pm 5\%$ . Slična promjena ukupne količine oborine očekuje se i u P2. Neznatno veće povećanje oborine do 10 % zahvaća područje središnje i sjeverozapadne Hrvatske. U P2 je ljeti moguće smanjenje oborine do 10 % na većem dijelu obale, dok se u jesen može očekivati povećanje oborine do 10 % uz granicu s Bosnom i Hercegovinom te uz obalu.

RCP8.5 scenarij daje promjenu oborinskog režima sličnih karakteristika kao i RCP4.5. U P1 razdoblju su promjene oborine male, zimi unutar  $\pm 5\%$ , u proljeće i jesen do 10 % uz obalu, dok ljeti na manjem području sjevernog dijela Gorskog kotara može biti do 20 % manje oborine, posebno zimi za oba buduća razdoblja. Ljeti je smanjenje oborine jače izraženo u P2, tako da u planinskim predjelima i uz obalu na pojedinim područjima može biti i do 20 % manje oborine. U proljeće i jesen povećanje oborine može na pojedinim dijelovima Hrvatske iznositi između 5 i 10 %, dok se zimi najveće povećanje oborine do 20 % može očekivati na sjeveru Hrvatske te ponegdje uz obalu.



©DHMZ SK



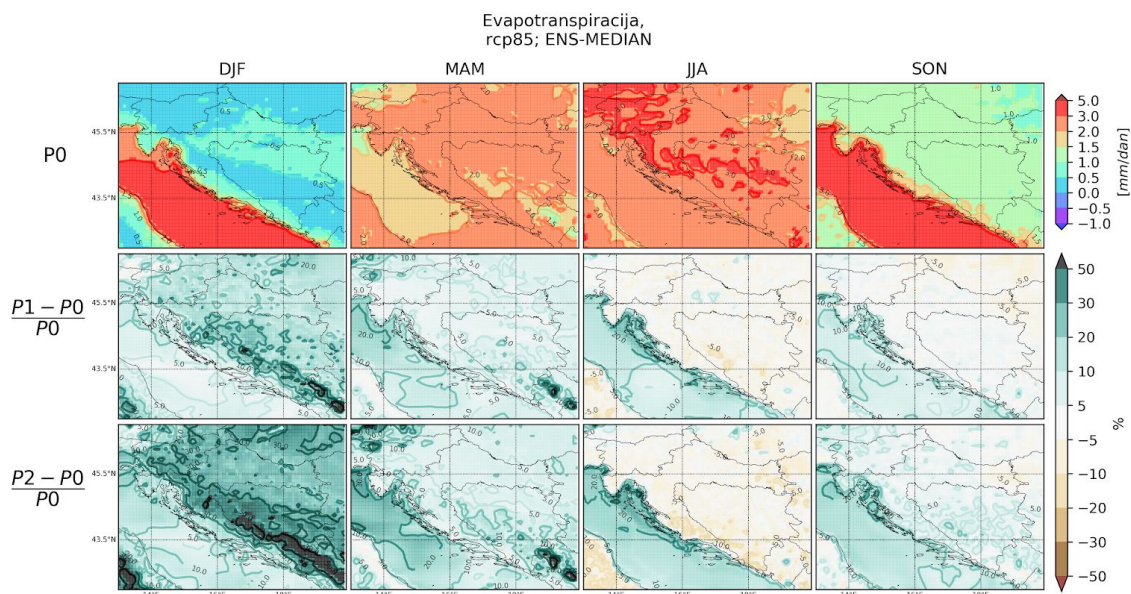
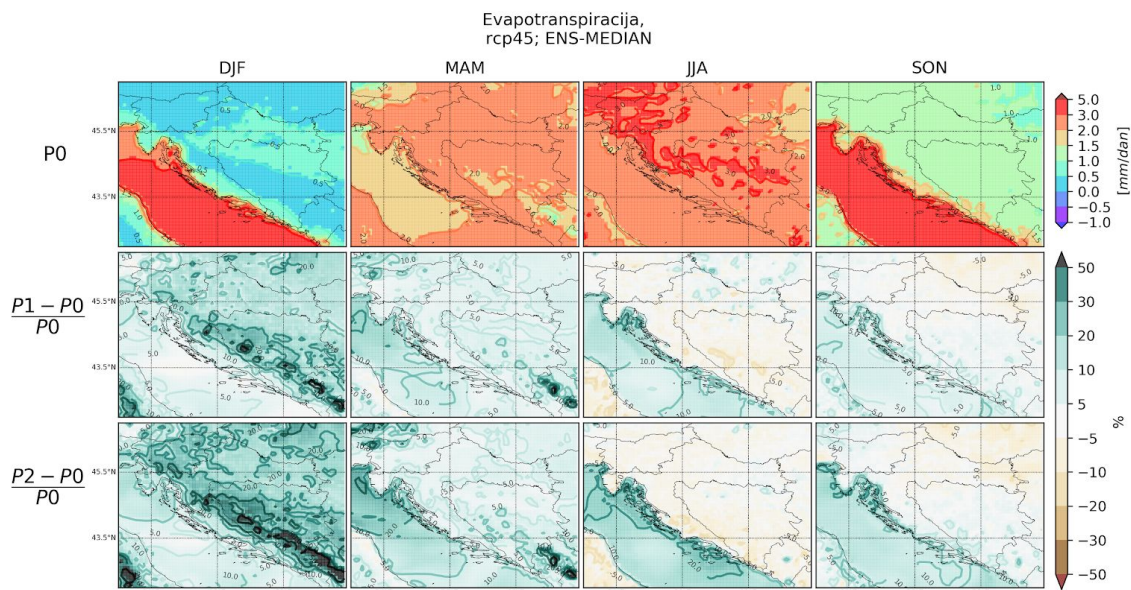
©DHMZ SK

**Slika 3.1.2** Medijan ansambla ukupne količine oborine (u mm/dan) iznad cijele domene iz EURO-CORDEX projekcija u sadašnjoj klimi P0 (1971.-2000.) prvi red, promjena u bliskoj budućnosti P1-P0 razdoblju drugi red i sredinom stoljeća P2-P0 treći red za RCP4.5 scenarij (gornja slika) i RCP8.5 (donja slika). Rezultati su prikazani za svaku sezonu odvojeno (stupci s lijeva na desno).

Ansambel medijana ukupne evapotranspiracije (Slika 3.1.3) raste s porastom temperature zraka i najveći je ljeti. Na većem dijelu Hrvatske iznosi 2-3 mm/dan, a u najvišem gorju i do 5 mm/dan. U proljeće su simulirane vrijednosti 2-3 mm/dan u cijeloj Hrvatskoj, osim uz obalu gdje iznose 1.5-2 mm/dan. U jesen modeli daju za najveći dio Hrvatske evapotranspiraciju 1-1.5 mm/dan, a uz obalu mora vrijednosti postupno rastu od 1.5-2 mm/dan do 5 mm/dan. Zimi su uz more slične vrijednosti kao u jesen, u unutrašnjosti priobalja i u većem dijelu unutrašnjosti Hrvatske 0.5-1 mm/dan, dok u sjeverozapadnim krajevima i u Gorskom kotaru iznosi 0-0.5 mm/dan.

U budućoj P1 klimi prema RCP4.5 scenariju su promjene evapotranspiracije unutar raspona  $\pm 5\%$  u većem dijelu Hrvatske u ljeto i jesen, te do 10 % uz obalu. U proljeće evapotranspiracija raste 5-10 %, a zimi i do 10 %. Slična promjena evapotranspiracije se očekuje u P2, uz povećan porast uz obalu u ljeto i jesen, do 20 %, te zimi do 20 % u orografski razvijenim dijelovima zemlje.

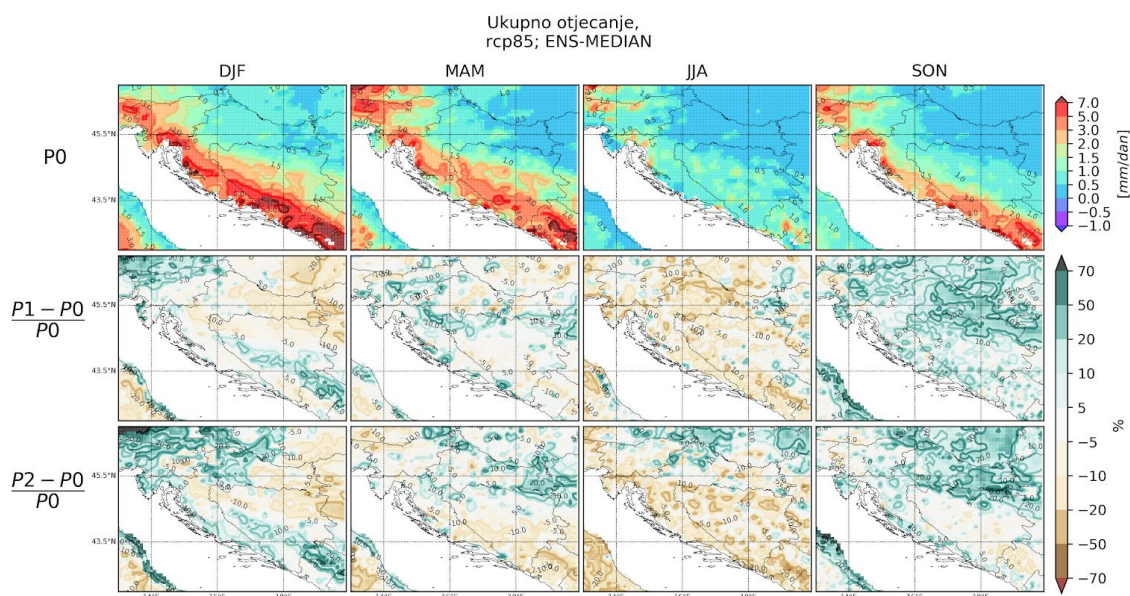
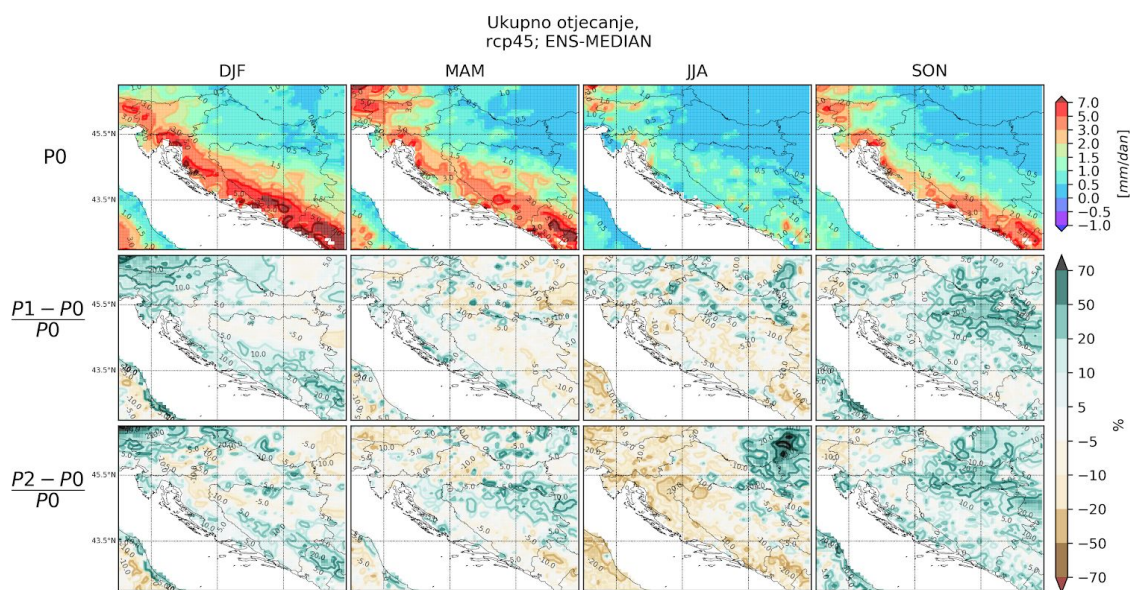
RCP8.5 scenarij daje vrlo sličan oblik promjene evapotranspiracije kao i RCP4.5. U proljeće, ljeto i jesen su promjene evapotranspiracije u obje klime (P1 i P2) uglavnom unutar  $\pm 5\%$  u kontinentalnom dijelu zemlje, osim uz obalu gdje evapotranspiracija raste 10-20 %. U zimi su promjene najizraženije, evapotranspiracija se uglavnom povećava, najviše u orografski razvijenim područjima, u P1 10 do 20 %, u P2 između 30 i 50 %.



**Slika 3.1.3** Medijan ansambla evapotranspiracije (u mm/dan) iznad cijele domene iz EURO-CORDEX projekcija u sadašnjoj klimi P0 (1971.-2000.) prvi red, promjena u bliskoj budućnosti P1-P0 razdoblju drugi red i sredinom stoljeća P2-P0 treći red za RCP4.5 scenarij (gornja slika) i RCP8.5 (donja slika). Rezultati su prikazani za svaku sezonu odvojeno (stupci s lijeva na desno).

Medijan ansambla ukupnog otjecanja (Slika 3.1.4) je u svim sezonama najveći uz orografski razvijenu unutrašnjost obale Jadrana i opada prema sjeveru Hrvatske. Prostorni gradijent ukupnog otjecanja je najmanji u ljeto (uz vrijednosti između 0 i 3 mm/dan) a najveći zimi s maksimalnim otjecanjem do 7 mm/dan na najvišim vrhovima planinskog masiva.

U budućoj se klimi prema RCP4.5 scenariju medijan ansambla ukupnog otjecanja mijenja uglavnom unutar raspona  $\pm 10$  % u zimu i proljeće u P1 i P2. U ljeto je u P2 izraženije smanjenje otjecanja, ponegdje i više od 20 %, dok je u jesen obje klime prisutno povećanje ukupnog otjecanja na istoku Hrvatske do 20 %. Prema RCP8.5 scenariju promjene medijana ansambla ukupnog otjecanja su slične kao i za RCP4.5 scenarij uz nešto izraženije promjene. U jesen simulirano povećanje ukupnog otjecanja u P2 klimi iznosi 20-50 %, dok je ljeti uz smanjenje otjecanja do 10 % na većem dijelu Hrvatske, na samom sjeverozapadu Hrvatske prisutno i manje povećanje ukupnog otjecanja (do 10 %).



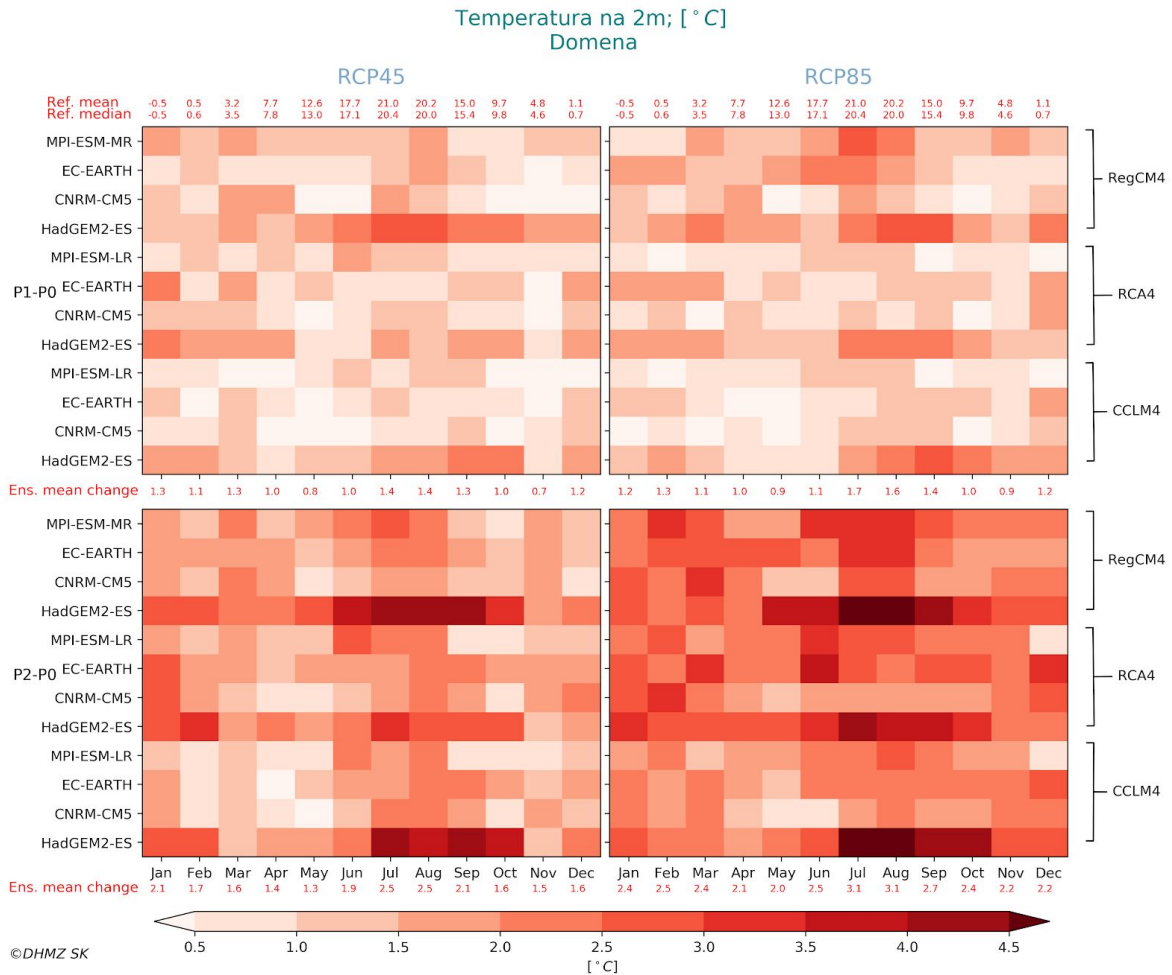
**Slika 3.1.4** Medijan ansambla ukupnog otjecanja (u mm/dan) iznad cijele domene iz EURO-CORDEX projekcija u sadašnjoj klimi P0 (1971.-2000.) prvi red, promjena u bliskoj budućnosti P1-P0 razdoblju drugi red i sredinom stoljeća P2-P0 treći red za RCP4.5 scenarij (gornja slika) i RCP8.5 (donja slika). Rezultati su prikazani za svaku sezonu odvojeno (stupci s lijeva na desno). Napomena: sposobnost klimatskih modela za simuliranje otjecanja na području krša je bitno ograničena.

## 3.2 Prostorni srednjaci za područja odabranih slivova

U ovom se poglavlju može vidjeti kakav je utjecaj početnih uvjeta globalnih klimatskih modela na forsiranje regionalnih modela. Svaki je regionalni klimatski model forsiran s 4 globalna klimatska modela, a odziv promjene buduće klime u odnosu na referentnu je različit ovisno o globalnom modelu i primijenjenom scenariju emisija i koncentracija stakleničkih plinova. Svaka slika u ovom poglavlju nosi informaciju o mjesečnom srednjaku i medijanu ansambla referentne klime (tzv. sadašnje klime, P0) na vrhu slike ("Ref. mean" i "Ref. median"), te mjesečnoj promjeni ansambla klime za pojedino buduće razdoblje u odnosu na referentnu klimu (pri dnu slike; "Ens. mean change") za oba forsiranja. Promjene u budućoj klimi su analizirane pomoću ansambla srednje promjene po mjesecima.

1. Čitava domena: šire područje Republike Hrvatske.

Na Slici 3.2.1 je prikazana simulirana promjena temperature osrednjena na području čitave domene. Uočava se porast temperature zraka u svim mjesecima, uz najveće promjene za forsiranje dobiveno globalnim modelom HadGEM2-ES. Porast temperature je jače izražen sredinom stoljeća u tzv. P2 klimi, a također i za RCP8.5 scenarij. Najveći porast se uočava u srpnju i kolovozu, kada ansambl promjene u P1 klimi iznosi 1.4 °C za RCP4.5, 1.7 °C u srpnju za RCP8.5, u klimi P2 2.5 °C u srpnju i kolovozu za RCP4.5, te 3.1 °C u srpnju i kolovozu za RCP8.5.

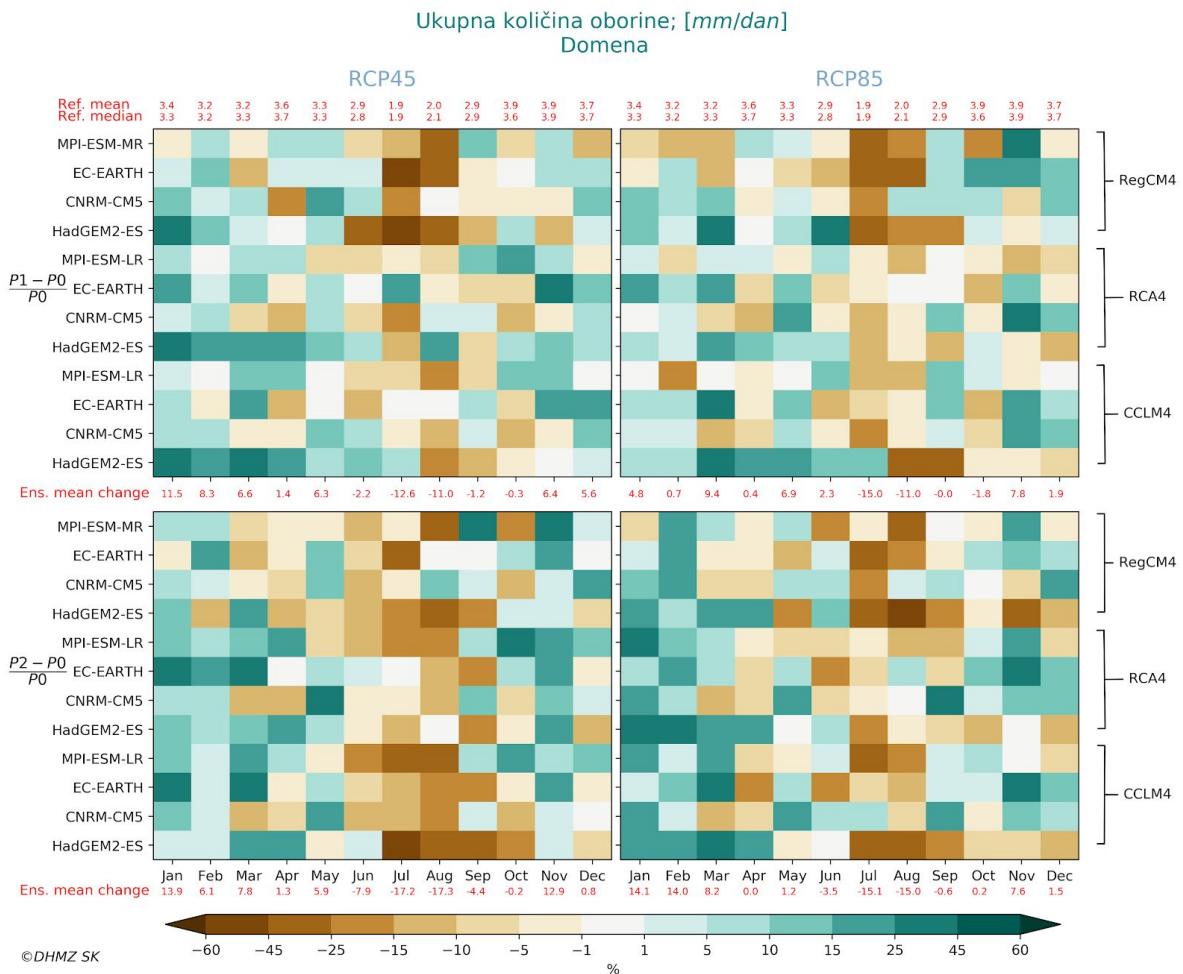


**Slika 3.2.1** Promjena temperature zraka na 2 m (u °C) iznad cijele domene (šire područje Republike Hrvatske) iz EURO-CORDEX projekcija u P1 razdoblju (2011.-2040.) u usporedbi s referentnom klimom P0 (1971.-2000.) - gornji red, u P2 razdoblju (2041.-2070.) u usporedbi s referentnom klimom P0 - donji red. Lijevi stupac je za RCP4.5 scenarij, desni za RCP8.5. Lijevi stupac teksta: globalni klimatski modeli; desni stupac teksta: regionalni klimatski modeli.

Oborina kao puno promjenjiviji parametar, nema uvijek jedinstven predznak u jednom regionalnom modelu za različita forsiranja globalnim modelima (Slika 3.2.2). Iste razlike postoje i kada se promatraju tri realizacije regionalnih klimatskih modela. Jednako kao i za temperaturu, i ovdje se ističe HadGEM2-ES globalni model koji u regionalnim simulacijama daje najveće mjesečne promjene. Promjene u ansamblu mjesečne količine oborine iznad cijele domene ukazuju na smanjenje oborine u razdoblju od lipnja do listopada za RCP4.5 s najvećim smanjenjem, 12.6 % manje oborine u P1 klimi nego u P0 u srpnju, te 17.3 % manje oborine u kolovozu u P2 klimi u odnosu na P0. Povećanje količine oborine može se očekivati u hladnom dijelu godine (u P1 klimi se očekuje 11.5 %



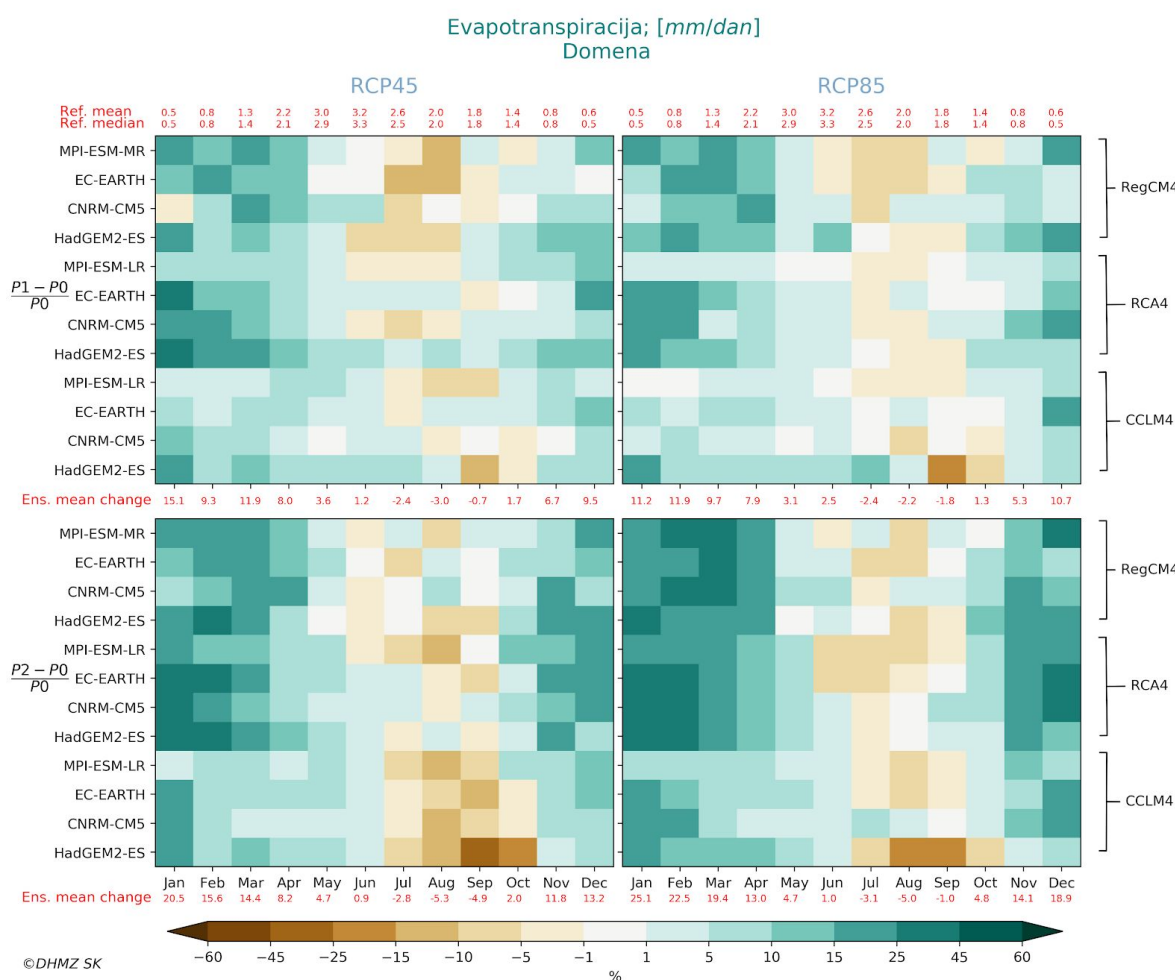
više oborine u siječnju, dok je u P2 klimi najveće povećanje 13.9 % također u siječnju). RCP8.5 scenarij u P1 klimi daje smanjenje oborine od srpnja do listopada. Najveća je amplituda u srpnju, uz smanjenje oborine od 15.0 %. U P2 klimi se smanjenje oborine očekuje od lipnja do rujna, uz najveće smanjenje oborine od 15.1 % u srpnju. Najveće povećanje oborine u ansamblu srednjaka za RCP8.5 se očekuje u ožujku za P1 klimu (9.4 %), odnosno u siječnju za P2 klimu (14.1 %).



**Slika 3.2.2** Isto kao 3.2.1. ali za ukupnu količinu oborine (%). Prva dva reda (Ref. mean i Ref. median): srednja mjesečna vrijednost u P0 (mm/dan).

Simulirana ukupna evapotranspiracija se u budućoj klimi povećava u hladnom dijelu godine, a smanjuje u ljetnim mjesecima (Slika 3.2.3). To je u skladu s promjenom ukupne količine oborine i porastom temperature zraka. U obje klime, i za oba forsiranja, smanjenje evapotranspiracije se uočava od srpnja do rujna. U P1 klimi je najveće smanjenje evapotranspiracije zabilježeno u kolovozu (3.0 %) za RCP4.5, odnosno u srpnju (2.4 %) za RCP8.5 scenarij. Povećanje evapotranspiracije u P1 je najveće u siječnju (15.1 %) za

RCP4.5, odnosno u veljači (11.9 %) za RCP8.5. Sredinom stoljeća, za P2 klimu, je predznak promjene evapotranspiracije isti kao u P1 uz nešto veće amplitude. Najveće smanjenje evapotranspiracije je 5.3 % u kolovozu za RCP4.5, te 5.0 % također u kolovozu za RCP8.5. Najveće povećanje evapotranspiracije je u siječnju i iznosi 20.5 % za RCP4.5, odnosno 25.1 % za RCP8.5.

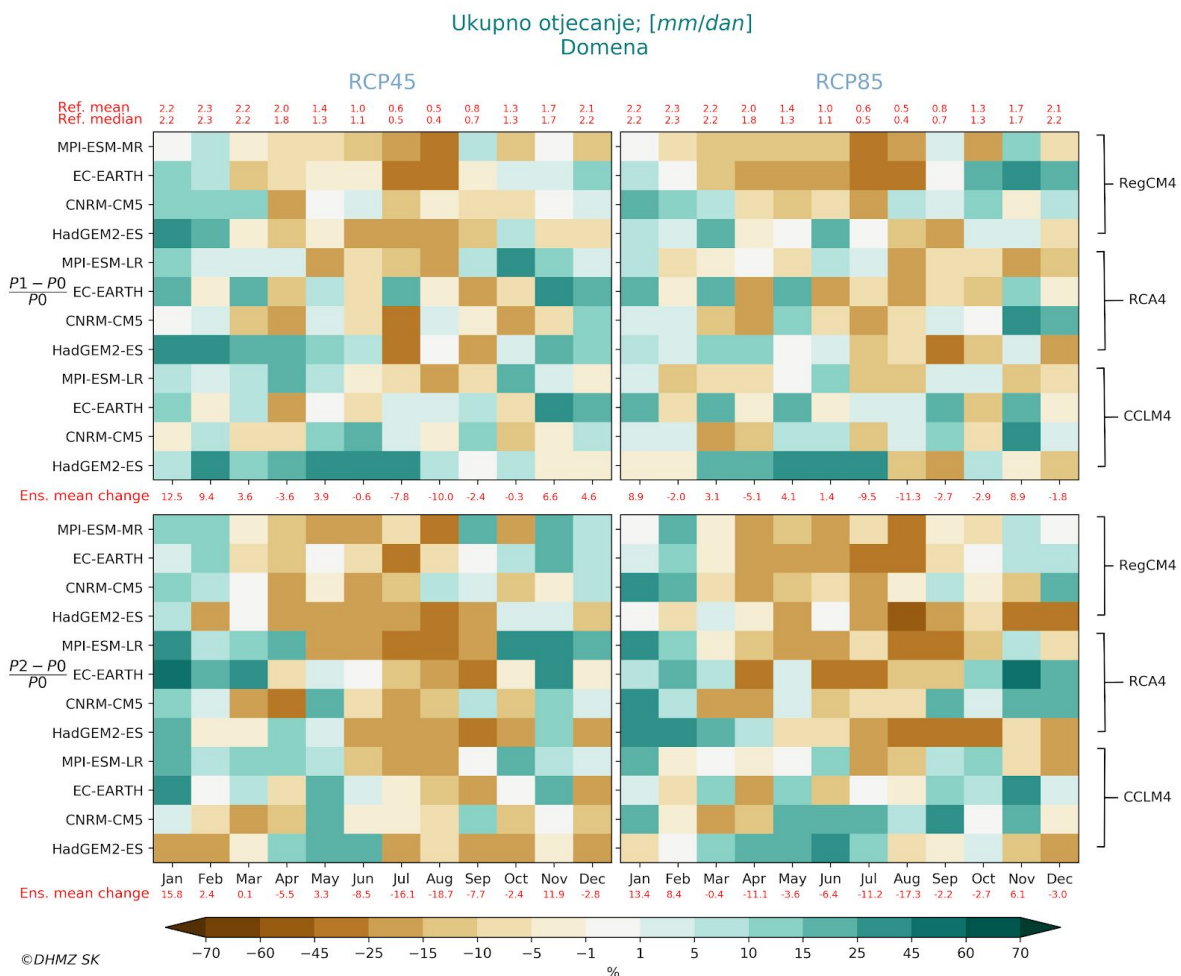


**Slika 3.2.3** Isto kao 3.2.1. ali za evapotranspiraciju (%). Prva dva reda (Ref. mean i Ref. median) srednja mjesečna vrijednost u P0 (mm/dan).

Simulirana promjena ansambla ukupnog otjecanja (Slika 3.2.4) pokazuje da se u budućnosti u većem dijelu godine može očekivati smanjenje otjecanja, a samo u pojedinim (uglavnom hladnijim) mjesecima povećanje otjecanja. U P1 klimi se smanjenje otjecanja očekuje u travnju, te kontinuirano od lipnja do listopada za RCP4.5. Najveće smanjenje otjecanja očekuje se u kolovozu (10.0 %). U istoj klimi, za isto forsiranje najveće povećanje ukupnog otjecanja očekuje se u siječnju (12.5 %). Za RCP8.5 najveće povećanje otjecanja se također očekuje u siječnju i studenom, ali nešto manjeg iznosa nego u RCP4.5 (8.9 %).

Smanjenje ukupnog otjecanja za RCP8.5 forsiranje očekuje se u veljači, travnju, i prosincu te kontinuirano od lipnja do listopada. Najveće smanjenje otjecanja očekuje se u kolovozu (11.3 %).

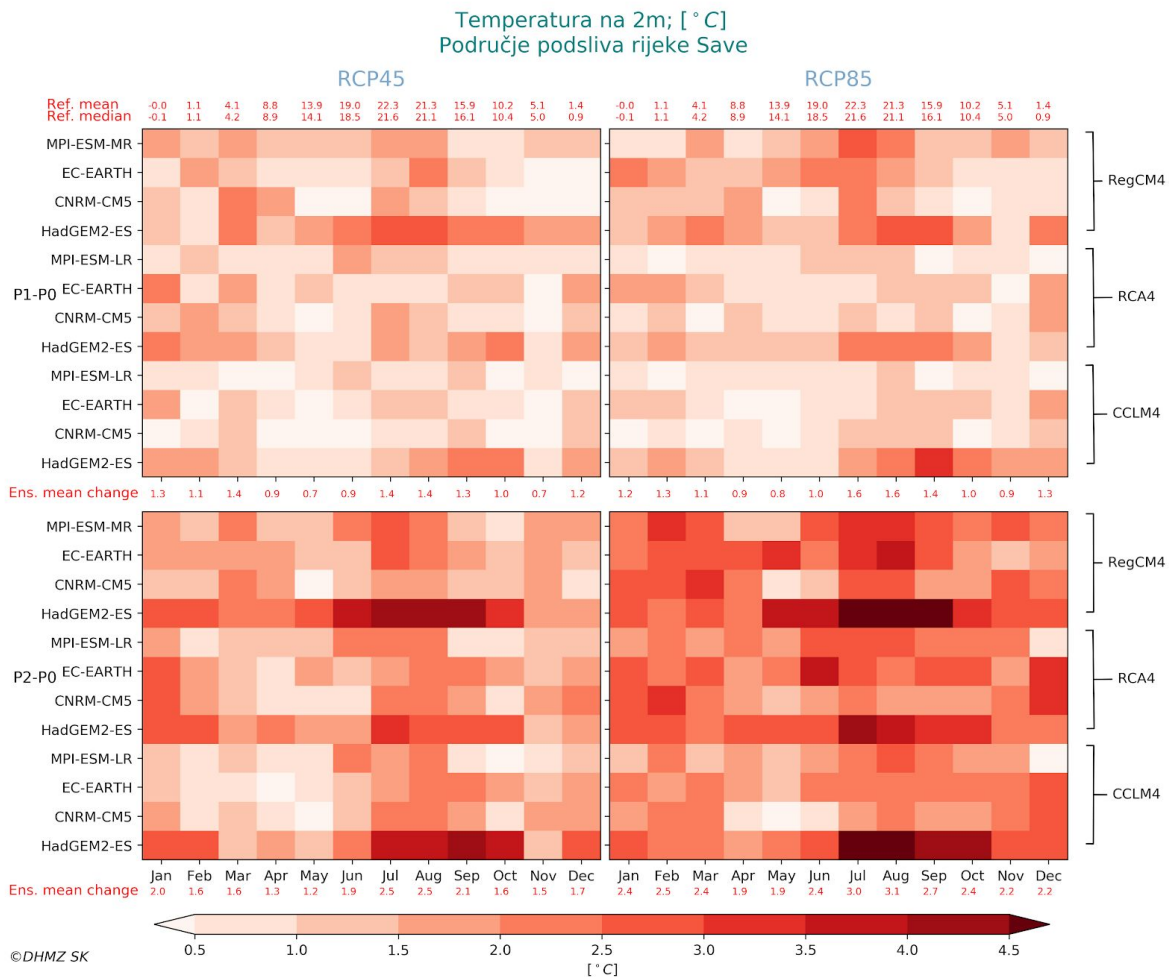
Za P2 klimu i RCP45 forsiranje, smanjenje otjecanja se može očekivati u travnju, prosincu i kontinuirano od lipnja do listopada. Najveće smanjenje se očekuje u kolovozu i iznosi 18.7 %. Najveće povećanje otjecanja, 15.8 %, očekuje se u siječnju. RCP8.5 scenarij za P2 klimu ukazuje na moguće smanjenje otjecanja od ožujka do listopada te u prosincu. Najveće smanjenje, 17.3 % može se očekivati u kolovozu. Najveće povećanje otjecanja se kao i za RCP4.5 može očekivati u siječnju, u iznosu od 13.4 %.



**Slika 3.2.4** Isto kao 3.2.1. ali za ukupno otjecanje (%). Prva dva reda (Ref. mean i Ref. median): srednja mjesečna vrijednost u P0 (mm/dan). Napomena: sposobnost klimatskih modela za simuliranje otjecanja na području krša je bitno ograničena.

## 2. Područje podsliva rijeke Save

Na području podsliva rijeke Save ansambl srednje promjene temperature zraka na 2 m je pozitivan za sve promatrane simulacije. U P1 razdoblju najveći porast temperature se očekuje u srpnju i kolovozu (1.4 °C za RCP4.5, 1.6 °C za RCP8.5). U P2 razdoblju je porast najveći u istim mjesecima (2.5 °C za RCP4.5, 3.1 °C u kolovozu za RCP8.5).

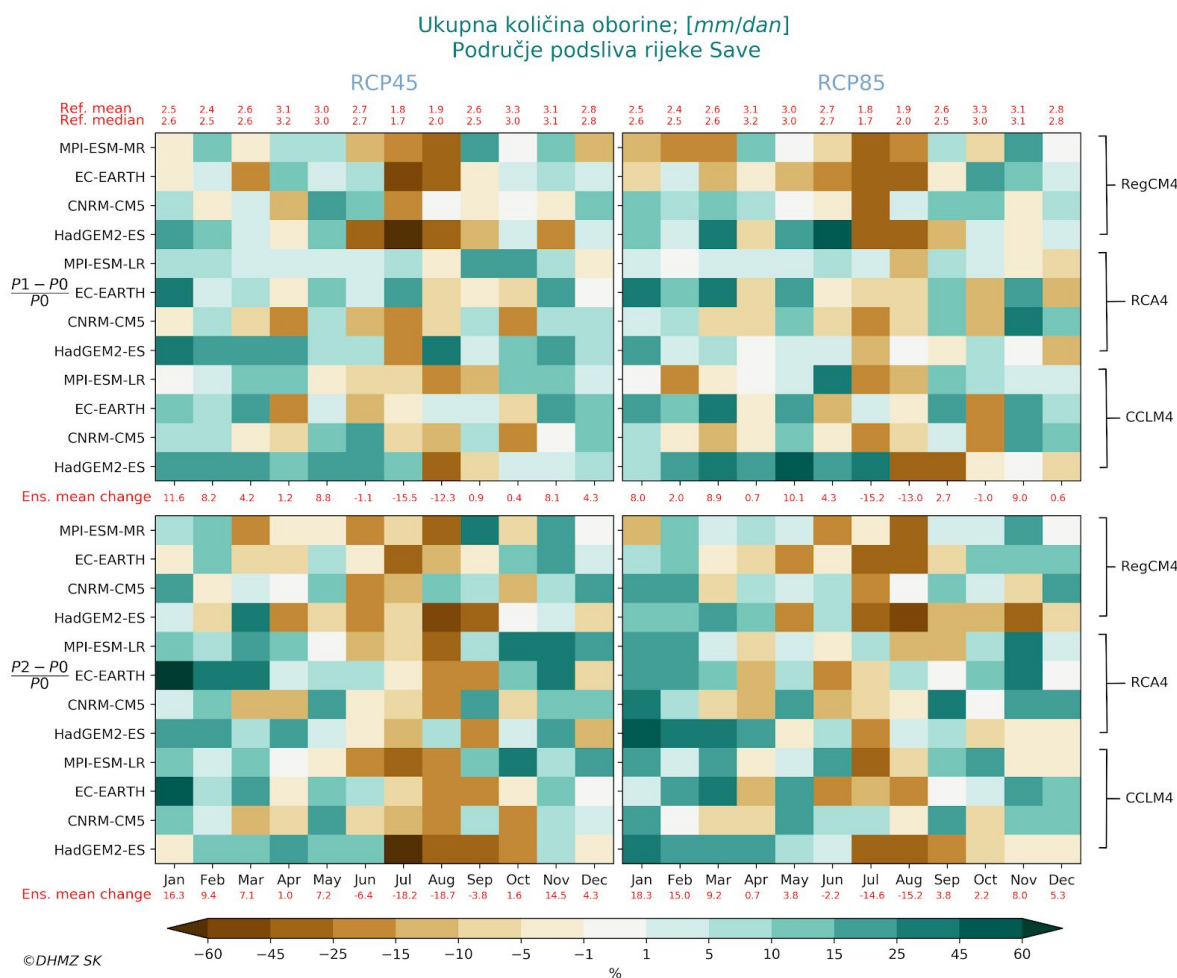


**Slika 3.2.5** Promjena temperature zraka na 2 m (u °C) za područje podsliva rijeke Save iz EURO-CORDEX projekcija u P1 razdoblju (2011.-2040.) u usporedbi s referentnom klimom P0 (1971.-2000.) - gornji red, u P2 razdoblju (2041.-2070.) u usporedbi s referentnom klimom P0 - donji red. Lijevi stupac je za RCP4.5 scenarij, desni za RCP8.5. Lijevi stupac teksta: globalni klimatski modeli; desni stupac teksta: regionalni klimatski modeli.

Ansambel srednje promjene ukupne količine oborine za područje podsliva rijeke Save (Slika 3.2.6) ukazuje na smanjenje oborine u P1 za RCP4.5 od lipnja do kolovoza, uz najveće smanjenje 15.5 % u srpnju. Za RCP8.5 forsiranje, očekuje se smanjenje oborine u srpnju i

kolovozu (15.2 % u srpnju), te listopadu. Najveće povećanje u ansamblu srednje količine oborine u P1 klimi za RCP4.5 se očekuje u siječnju 11.6 %, za RCP8.5 10.1 % u svibnju.

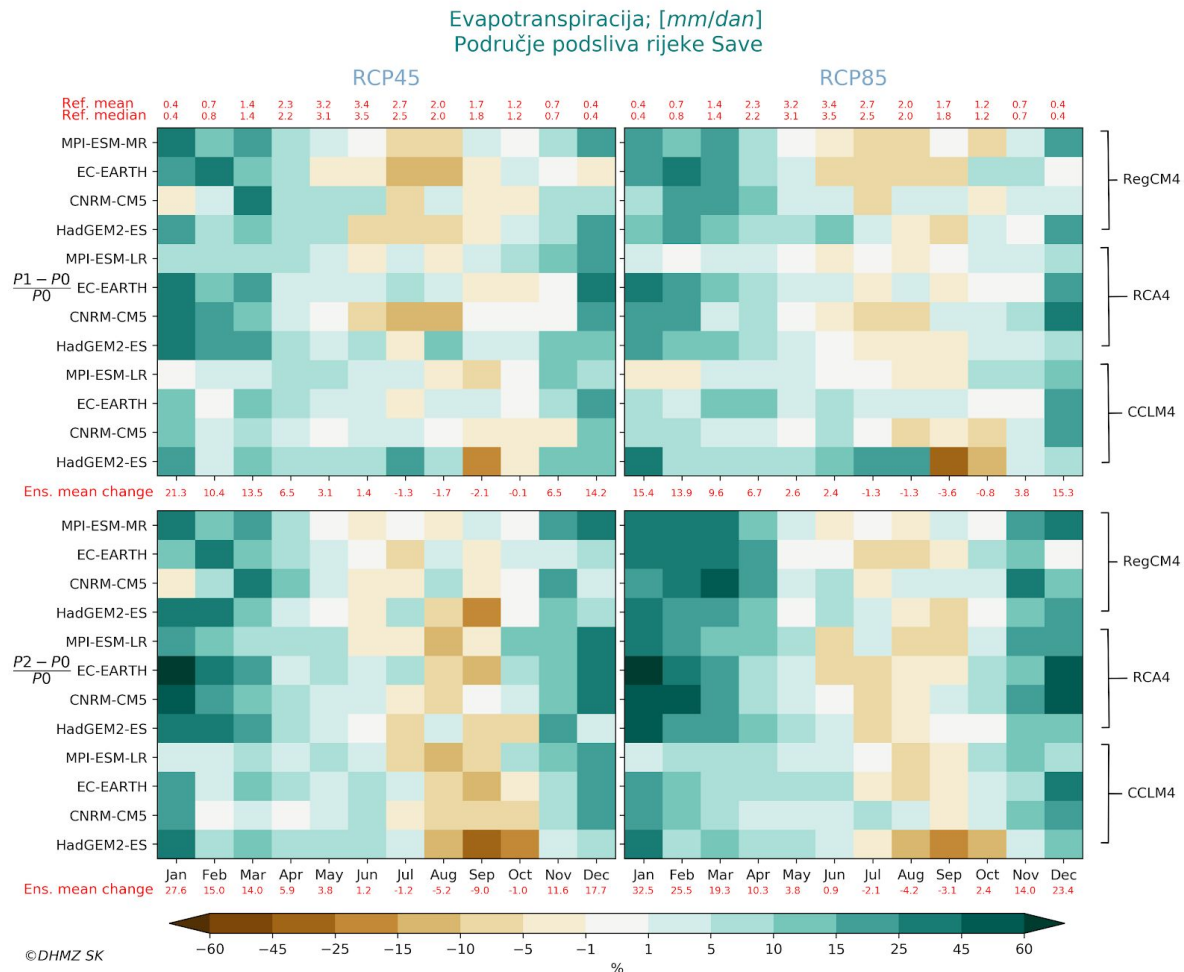
Sredinom stoljeća, u P2 klimi se očekuje smanjenje oborine od lipnja do rujna za RCP4.5 scenarij, te od lipnja do kolovoza za RCP8.5 scenarij. Za oba forsiranja najveće smanjenje se očekuje u kolovozu, 18.7 % za RCP4.5, 15.2 % za RCP8.5. U ostalim mjesecima se očekuje povećanje oborine, uz najveće u siječnju za oba forsiranja (16.3 % za RCP4.5, 18.3 % za RCP8.5).



**Slika 3.2.6.** Isto kao Slika 3.2.5 ali za ukupnu količinu oborine (%). Prva dva reda (Ref. mean i Ref. median): srednja mjesečna vrijednost u P0 (mm/dan).

Ansambl promjene evapotranspiracije iz analiziranih simulacija na području podsliva rijeke Save (Slika 3.2.7) ukazuje na smanjenje od srpnja do listopada u P1 (najveće u rujnu; 2.1 % za RCP4.5, 3.6 % za RCP8.5). U ostalim mjesecima se očekuje povećanje, uz najveće amplitude u siječnju (21.3 % za RCP4.5, 15.4 % za RCP8.5). Sredinom stoljeća, u P2 klimi, evapotranspiracija je smanjena od srpnja do listopada za RCP4.5 (najveće smanjenje u

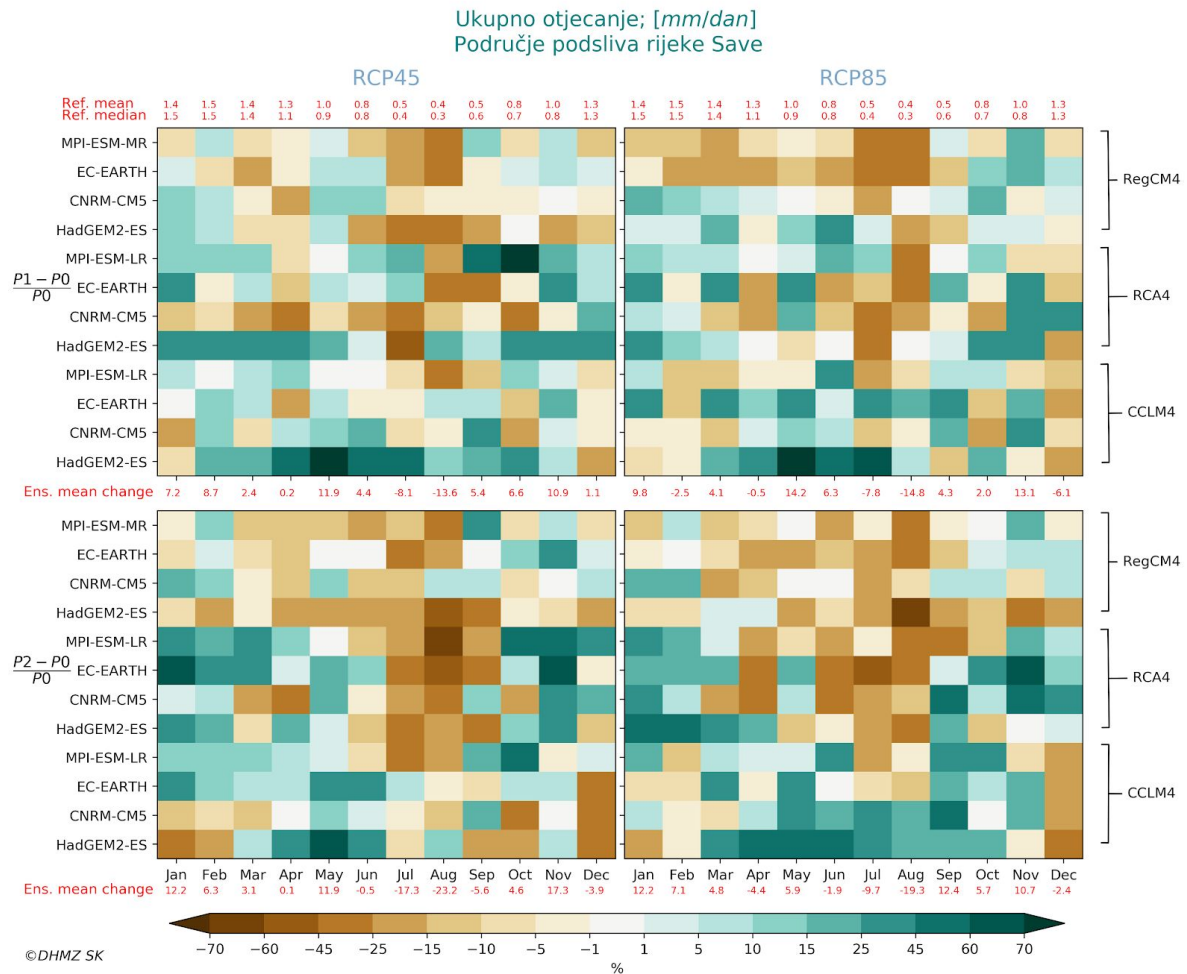
rujnu, 9 %), odnosno od srpnja do kolovoza za RCP8.5 (najveće smanjenje u kolovozu, 4.2 %). Jednako kao i za P1, u P2 se očekuje povećanje evapotranspiracije u svim ostalim mjesecima, uz najveće povećanje u siječnju (27.6 % za RCP4.5, 32.5 % za RCP8.5).



**Slika 3.2.7.** Isto kao Slika 3.2.5 ali za evapotranspiraciju (%). Prva dva reda (Ref. mean i Ref. median): srednja mjesečna vrijednost u P0 (mm/dan).

Ansambl promjene ukupnog otjecanja simuliran na području podsliva rijeke Save (Slika 3.2.9) pokazuje smanjenje ukupnog otjecanja u srpnju i kolovozu (13.6 % u kolovozu) te povećanje u svim ostalim mjesecima (najveće povećanje 11.9 % u svibnju) u P1 klimi za RCP4.5 scenarij. Prema istom scenariju ali sredinom stoljeća, u P2 klimi, razdoblje smanjenja ukupnog otjecanja će se produžiti, od lipnja do rujna, te u prosincu. Najveće smanjenje se očekuje u kolovozu, 23.2 %. Najveće povećanje može se očekivati u studenom u iznosu od 17.3 %. RCP8.5 scenarij daje smanjenje ukupnog otjecanja u P1 klimi u veljači, travnju, srpnju i kolovozu te u prosincu. Najveće smanjenje se očekuje u kolovozu (14.8 %). Najveće povećanje ukupnog otjecanja očekuje se u studenom, 13.1 %. U P2 klimi,

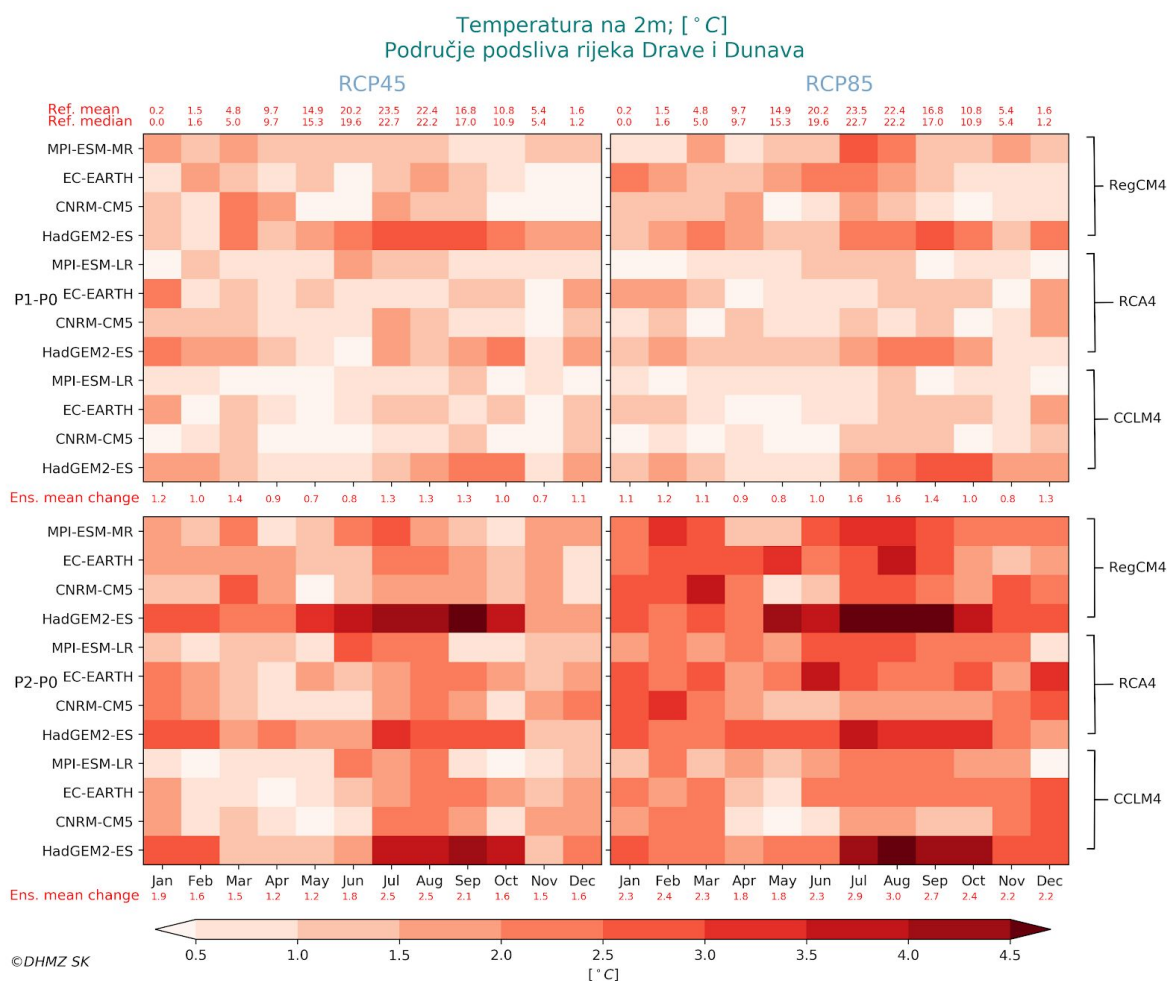
zmanjenje ukupnog otjecanja se oćekuje u travnju, od lipnja do kolovoza te u prosincu, uz najveće smanjenje 19.3 % u kolovozu. U rujnu se oćekuje najveće povećanje ukupnog otjecanja, 12.4 %.



**Slika 3.2.8.** Isto kao Slika 3.2.5 ali za ukupno otjecanje (%). Prva dva reda (Ref. mean i Ref. median): srednja mjesečna vrijednost u P0 (mm/dan).

### 3. Područje podsliva rijeka Drave i Dunava

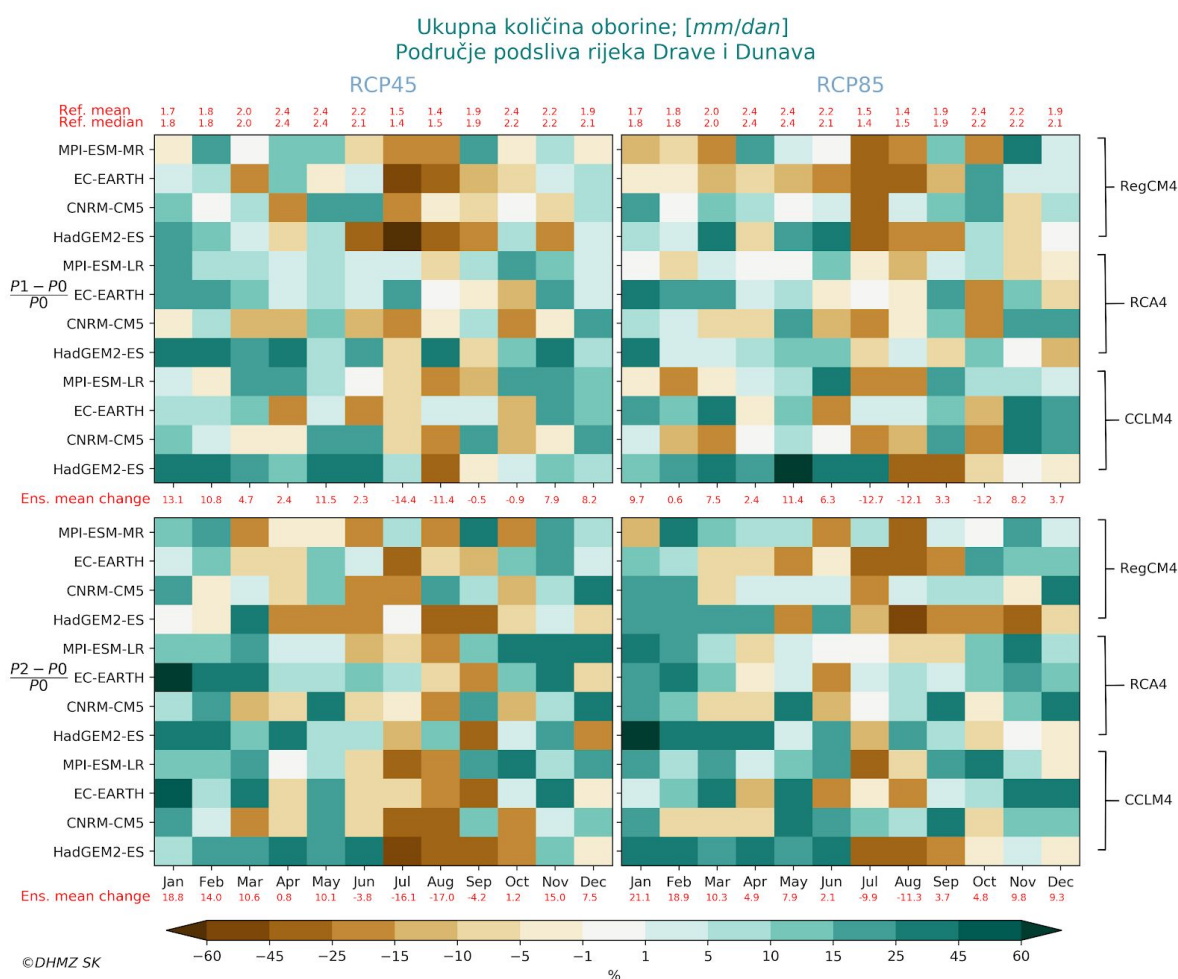
Ansambli promjene temperature zraka na 2 m na području podsliva rijeka Drave i Dunava (Slika 3.2.9) daje porast temperature zraka u svim mjesecima, za simulacije svih kombinacija globalnih i regionalnih klimatskih modela. U P1 razdoblju, najveći se porast očekuje od srpnja do rujna u iznosu 1.3 °C za RCP4.5, te u srpnju i kolovozu 1.6 °C za RCP8.5. Sredinom stoljeća, u P2 klimi, za forsiranje RCP4.5 je najveći porast u srpnju i kolovozu 2.5 °C, odnosno 3.0 °C u kolovozu za RCP8.5.



**Slika 3.2.9** Promjena temperature zraka na 2 m (u °C) za područje podsliva Drave i Dunava iz EURO-CORDEX projekcija u P1 razdoblju (2011.-2040.) u usporedbi s referentnom klimom P0 (1971.-2000.) - gornji red, u P2 razdoblju (2041.-2070.) u usporedbi s referentnom klimom P0 - donji red. Lijevi stupac je za RCP4.5 scenarij, desni za RCP8.5. Lijevi stupac teksta: globalni klimatski modeli; desni stupac teksta: regionalni klimatski modeli.



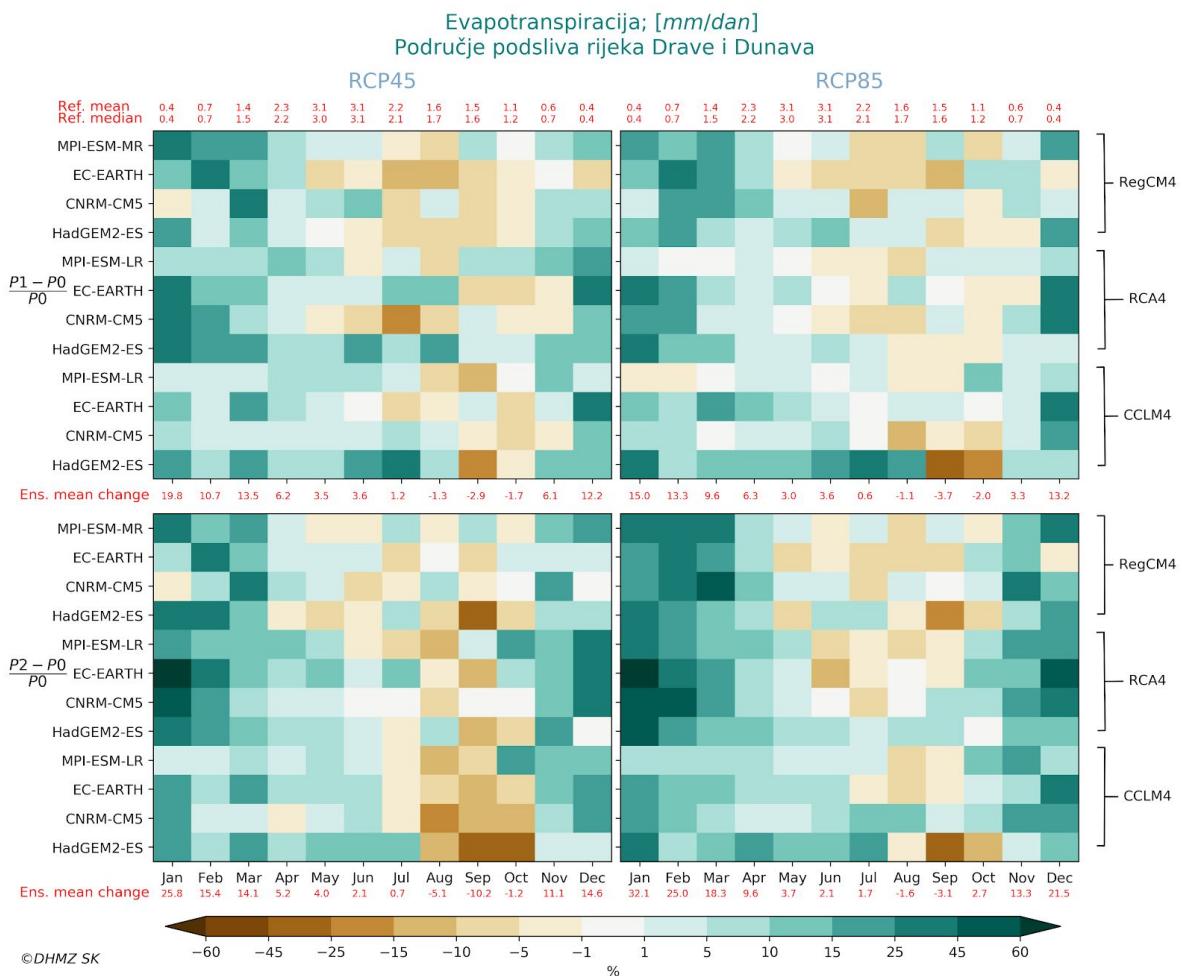
Prema ansamblu srednje promjene količine oborine na području podsliva rijeka Drave i Dunava (Slika 3.2.10) očekuje se smanjenje oborine u P1 za RCP4.5 od srpnja do listopada, uz najveće smanjenje od 14.4 % u srpnju. Uz RCP8.5 forsiranje smanjenje oborine se može očekivati u srpnju, kolovozu i listopadu (najveće smanjenje oborine je u srpnju 12.7 %). U ostalim se mjesecima očekuje povećanje oborine, najveće 13.1 % u siječnju za RCP4.5 forsiranje, te 11.4 % u svibnju za RCP8.5 forsiranje. U P2 razdoblju, ansambl srednje promjene oborine daje smanjenje oborine od lipnja do rujna za RCP4.5 forsiranje. Najveće smanjenje se očekuje u kolovozu, 17.0 %. Za RCP8.5 scenarij, smanjenje je prisutno u srpnju i kolovozu, pri čemu je jače izraženo u kolovozu (11.3 %). Povećanje ansambla srednje promjene oborine u P2 prisutno je u svim ostalim mjesecima, uz najveće vrijednosti u siječnju, 18.8 % za RCP4.5 i 21.1 % za RCP8.5.



**Slika 3.2.10.** Isto kao Slika 3.2.9 ali za ukupnu količinu oborine (%). Prva dva reda (Ref. mean i Ref. median): srednja mjesečna vrijednost u P0 (mm/dan).

Ansambli promjene evapotranspiracije za analizirane simulacije na području podsliva rijeka Drave i Dunava (Slika 3.2.11) ukazuje na smanjenje evapotranspiracije od kolovoza

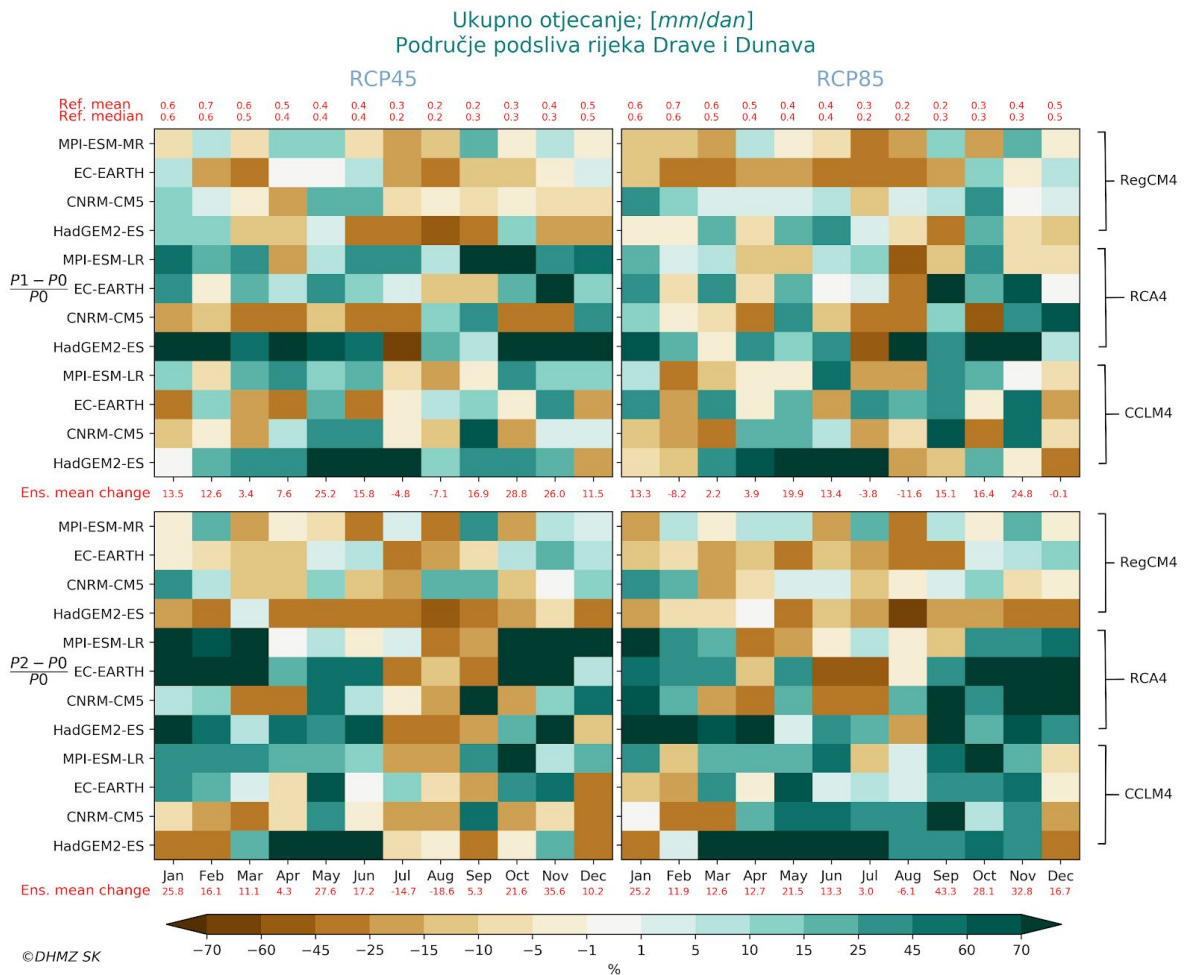
do listopada u P1 klimi (najveće u rujnu; 2.9 % za RCP4.5, 3.7 % za RCP8.5). U ostalim mjesecima se očekuje povećanje s najvećim vrijednostima u siječnju (19.8 % za RCP4.5, 15.0 % za RCP8.5). Za P2 klimu, uz forsiranje RCP4.5 ansambl promjene evapotranspiracije ima smanjenje od kolovoza do listopada (najveće je u rujnu, 10.5 %). Uz RCP8.5 forsiranje, ansambl promjene evapotranspiracije daje smanjenje u kolovozu i rujnu (3.1 % u rujnu). U ostalim se mjesecima može očekivati povećanje ansambla promjene evapotranspiracije, uz najveće vrijednosti u siječnju (25.8 % za RCP4.5, 32.1 % za RCP8.5).



**Slika 3.2.11.** Isto kao Slika 3.2.9 ali za evapotranspiraciju (%). Prva dva reda (Ref. mean i Ref. median): srednja mjesečna vrijednost u P0 (mm/dan).

Ansambel promjene ukupnog otjecanja na području podsliva Drave i Dunava (Slika 3.2.12) daje smanjenje ukupnog otjecanja u srpnju i kolovozu za P1 klimu forsiranu sa RCP4.5 (najveće je u kolovozu, 7.1 %), te smanjenje u veljači, srpnju, kolovozu i prosincu za RCP8.5 scenarij (najveće smanjenje je u kolovozu, 11.6 %). U ostalim se mjesecima očekuje povećanje, pri čemu je ono najveće u listopadu (28.8 %) za RCP4.5 te u studenom (24.8 %)

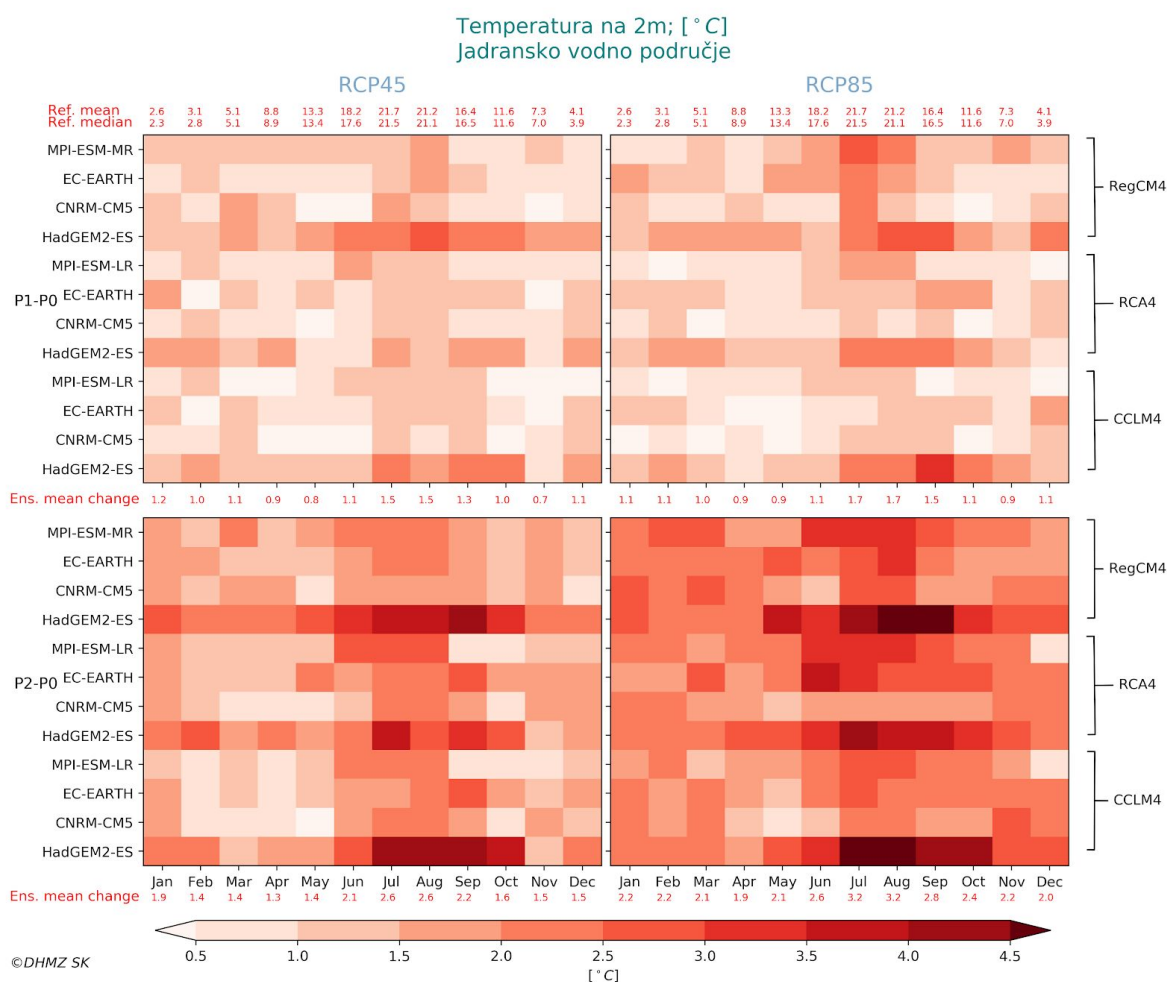
za RCP8.5 scenarij. Sredinom stoljeća, u P2 klimi očekuje se smanjenje ukupnog otjecanja u srpnju i kolovozu za RCP4.5 (18.6 % u kolovozu), te u kolovozu (6.1 %) za RCP8.5 scenarij. Prema analiziranim simulacijama, u svim ostalim mjesecima očekuje se povećanje ukupnog otjecanja, 35.6 % u studenom za RCP4.5 i 43.3 % u listopadu za RCP8.5.



**Slika 3.2.12.** Isto kao Slika 3.2.9 ali za ukupno otjecanje (%). Prva dva reda (Ref. mean i Ref. median): srednja mjesečna vrijednost u P0 (mm/dan).

#### 4. Jadransko vodno područje

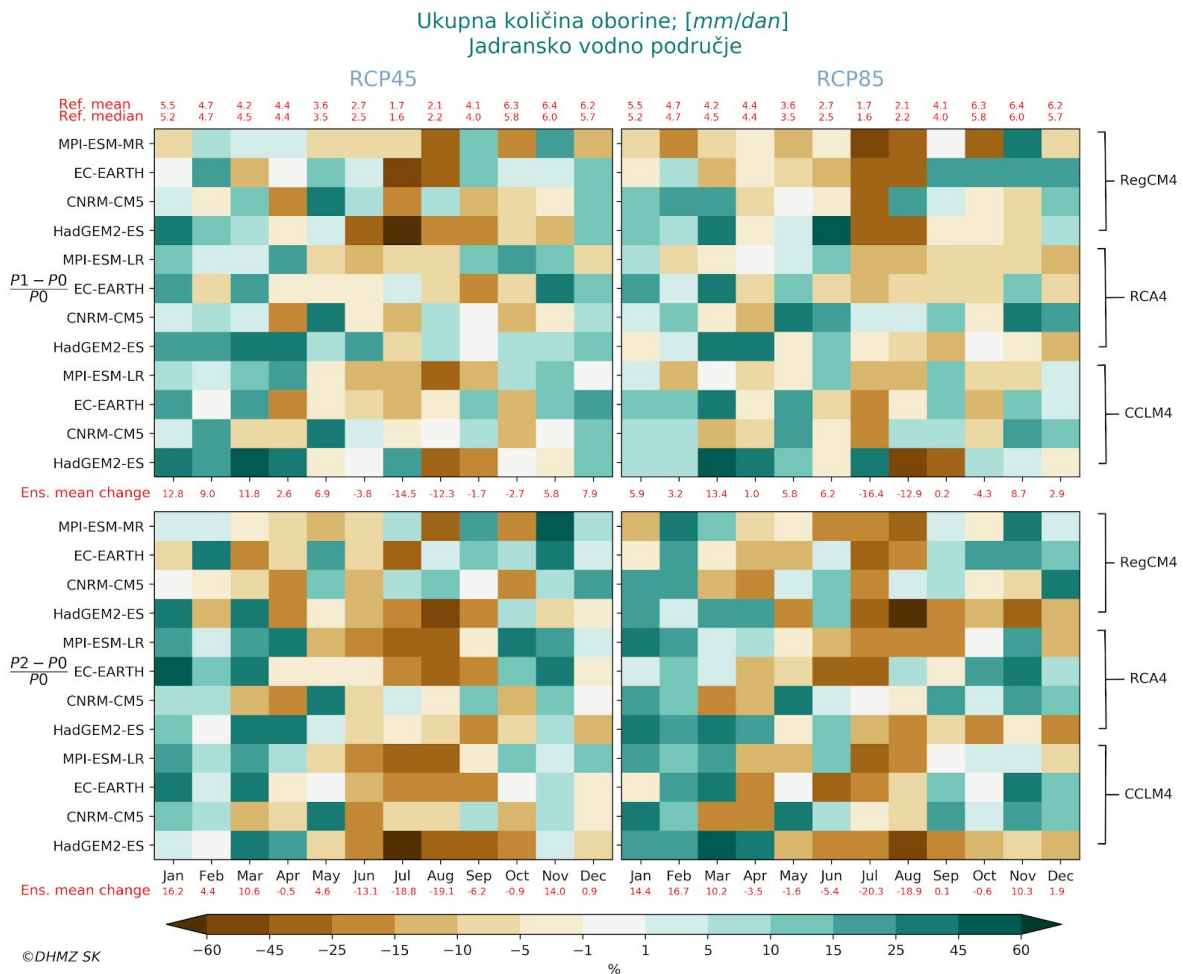
Ansambel promjene temperature zraka na 2 m na jadranskom vodnom području (Slika 3.2.13) daje porast temperature zraka u svim mjesecima, za sve analizirane simulacije korištenih kombinacija globalnih i regionalnih klimatskih modela. U P1 razdoblju, najveći se porast očekuje u srpnju i kolovozu u iznosu 1.5 °C za RCP4.5, 1.7 °C za RCP8.5. Sredinom stoljeća, u P2 klimi, za forsiranje sa RCP4.5 je najveći porast u srpnju i kolovozu 2.6 °C, odnosno 3.2 °C u srpnju i kolovozu za RCP8.5. Sredinom stoljeća se ističe forsiranje HadGEM2-ES globalnim modelom za sve regionalne modele, koje daje najveći porast temperature zraka u ljetnom dijelu godine.



**Slika 3.2.13** Promjena temperature zraka na 2 m (u °C) na jadranskom vodnom području iz EURO-CORDEX projekcija u P1 razdoblju (2011.-2040.) u usporedbi s referentnom klimom P0 (1971.-2000.) - gornji red, u P2 razdoblju (2041.-2070.) u usporedbi s referentnom klimom P0 - donji red. Lijevi stupac je za RCP4.5 scenarij, desni za

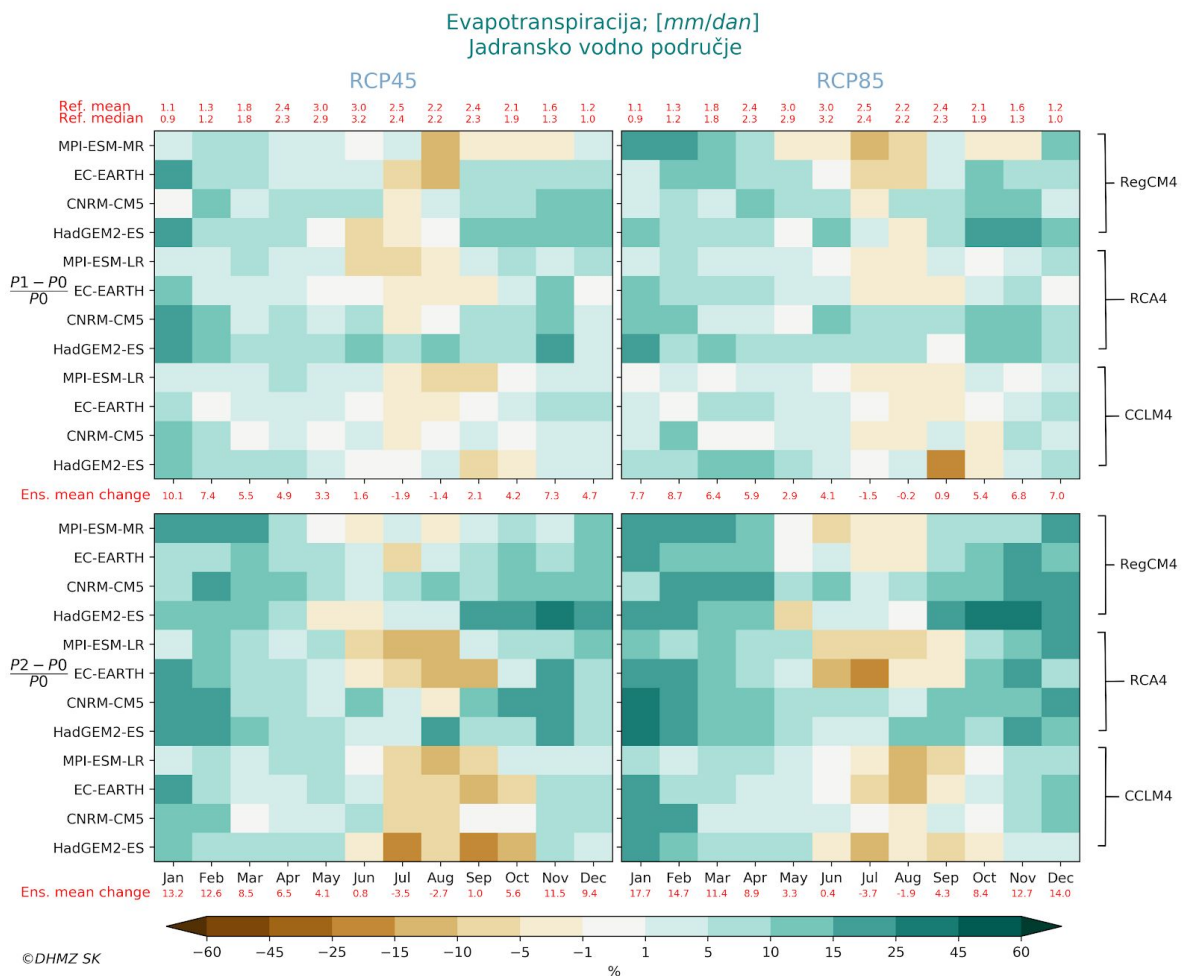
RCP8.5. Lijevi stupac teksta: globalni klimatski modeli; desni stupac teksta: regionalni klimatski modeli.

Ansambel srednje promjene količine oborine na jadranskom vodnom području (Slika 3.2.14) ukazuje na smanjenje oborine u P1 od lipnja do listopada za RCP4.5, te u srpnju, kolovozu i listopadu za RCP8.5 scenarij. Smanjenje je za oba forsiranja najveće u srpnju i iznosi 14.5 % za RCP4.5, te 16.4 % za RCP8.5. U ostalim mjesecima se očekuje povećanje oborine. Povećanje je najizraženije u siječnju za RCP4.5 (12.8 %) odnosno u ožujku za RCP8.5 (13.4 %). Sredinom stoljeća, odnosno u P2 klimi, se može očekivati smanjenje oborine u razdoblju od lipnja do listopada za RCP4.5, te od travnja do rujna i u listopadu za RCP8.5. Najveće smanjenje se očekuje u kolovozu za RCP4.5 (19.1 %), te srpnju za RCP8.5 (20.3 %). U ostalim se mjesecima očekuje povećanje oborine, najveće u siječnju za RCP4.5 (16.2 %) te u veljači za RCP8.5 (16.7 %).



**Slika 3.2.14.** Isto kao Slika 3.2.13 ali za ukupnu količinu oborine (%). Prva dva reda (Ref. mean i Ref. median): srednja mjesečna vrijednost u P0 (mm/dan).

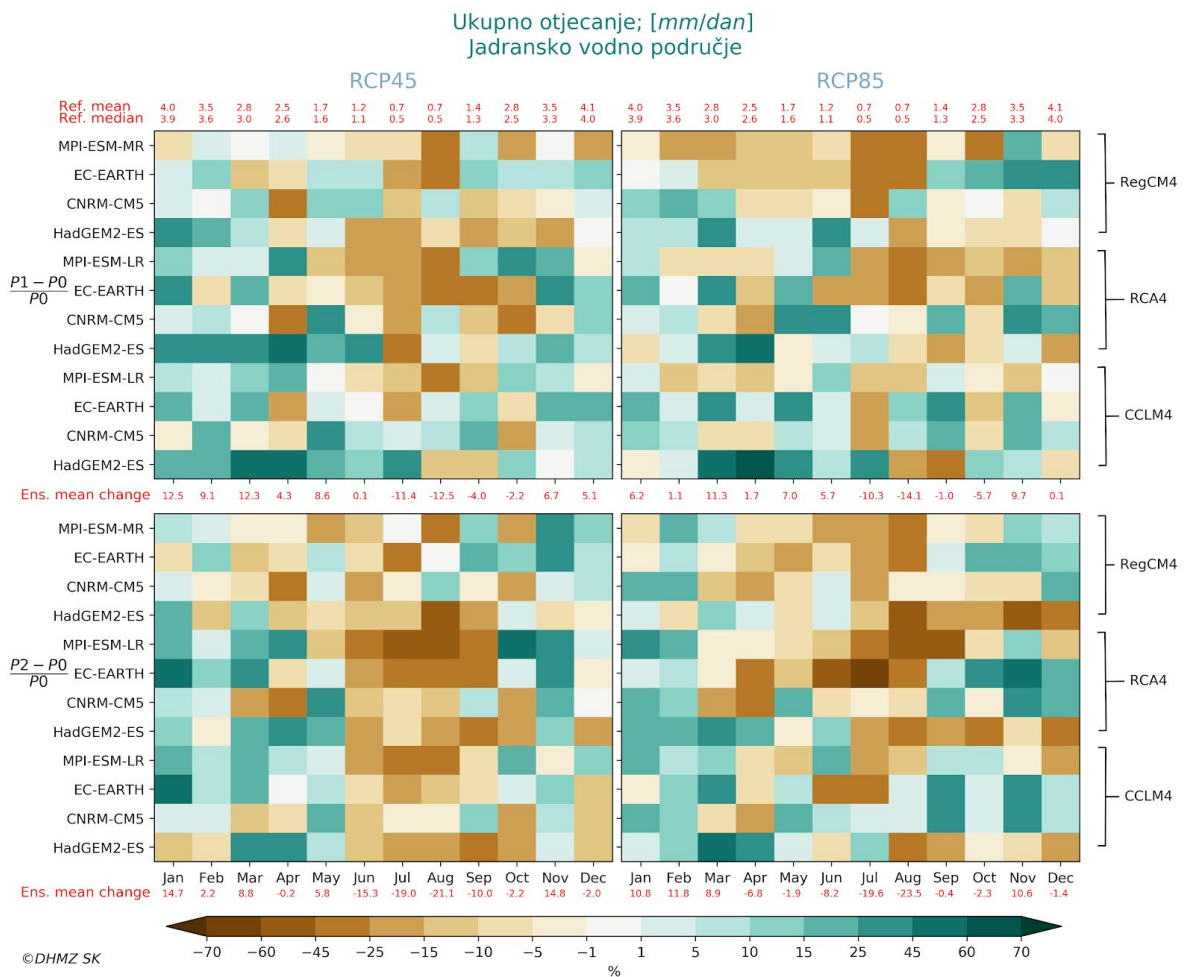
Ansambel promjene evapotranspiracije na jadranskom vodnom području (Slika 3.2.15) ukazuje na smanjenje u srpnju i kolovozu u P1 (veće u srpnju, 1.9 % za RCP4.5, 1.5 % za RCP8.5). U ostalim mjesecima se očekuje povećanje evapotranspiracije s najvećom amplitudom u siječnju 10.1 % za RCP4.5, odnosno u veljači 8.7 % za RCP8.5. Sredinom stoljeća, u P2 klimi, se smanjenje evapotranspiracije očekuje u istom razdoblju kao i u P1, uz veće smanjenje. Za RCP4.5 scenarij, očekuje se smanjenje od 3.5 % u srpnju, te 3.7 % za RCP8.5, također u srpnju. Simulirano povećanje evapotranspiracije je najveće u siječnju za oba forsiranja, i očekuje se 13.2 % za RCP4.5, te 17.7 % za RCP8.5.



**Slika 3.2.15.** Isto kao Slika 3.2.13 ali za evapotranspiraciju (%). Prva dva reda (Ref. mean i Ref. median) srednja mjesečna vrijednost u P0 (mm/dan).

Ansambel promjene ukupnog otjecanja na jadranskom vodnom području (Slika 3.2.16) pokazuje smanjenje od srpnja do listopada za P1 klimu forsiranu s oba scenarija (najveće smanjenje se očekuje u kolovozu, 12.5 % za RCP4.5, 14.1 % za RCP8.5). U ostalim se mjesecima očekuje povećanje, uz najveće vrijednosti 12.5 % u siječnju za RCP4.5 i 11.3 % u ožujku za RCP8.5. Sredinom stoljeća je smanjenje ukupnog otjecanja prisutno u većem

broju mjeseci nego u P1, za RCP4.5 je to od lipnja do listopada i u prosincu, uz najveće smanjenje u kolovozu, 21.1 %. Za RCP8.5 je smanjenje prisutno od travnja do listopada i u prosincu, uz najveće smanjenje u kolovozu, 23.5 %. Najveći porast ansambla promjene ukupnog otjecanja u P2 je za RCP4.5 simuliran je u studenom i iznosi 14.8 %, za RCP8.5 u veljači u iznosu 11.8 %.



**Slika 3.2.16.** Isto kao Slika 3.2.13 ali za ukupno otjecanje (%). Prva dva reda (Ref. mean i Ref. median): srednja mjesečna vrijednost u P0 (mm/dan). Napomena: sposobnost klimatskih modela za simuliranje otjecanja na području krša je bitno ograničena.

### 3.3 Maksimalna dnevna količina oborine za zadana povratna razdoblja

Usporedba maksimalne godišnje ukupne količine oborine za zadana povratna razdoblja (10, 20, 50, 100, 200, 500 i 1000 godina) prema srednjaku 12 modela između sadašnjeg (P0) i budućih razdoblja (P1 i P2) ukazuje na blago povećanje ekstremne godišnje količine oborine na cijelom području prikazane domene (Slika 3.3.1). Na kontinentalnom području promjene su slabije izražene i u prosjeku se kreću u vrijednostima od 50 - 200 mm s povećanjem povratnog razdoblja, dok su na obalnom području promjene izraženije i dosežu vrijednosti i preko 500 mm za najveće povratno razdoblje (1000 god.). Duž cijele obale povećanje je izraženije u P2 razdoblju i za scenarij RCP8.5.

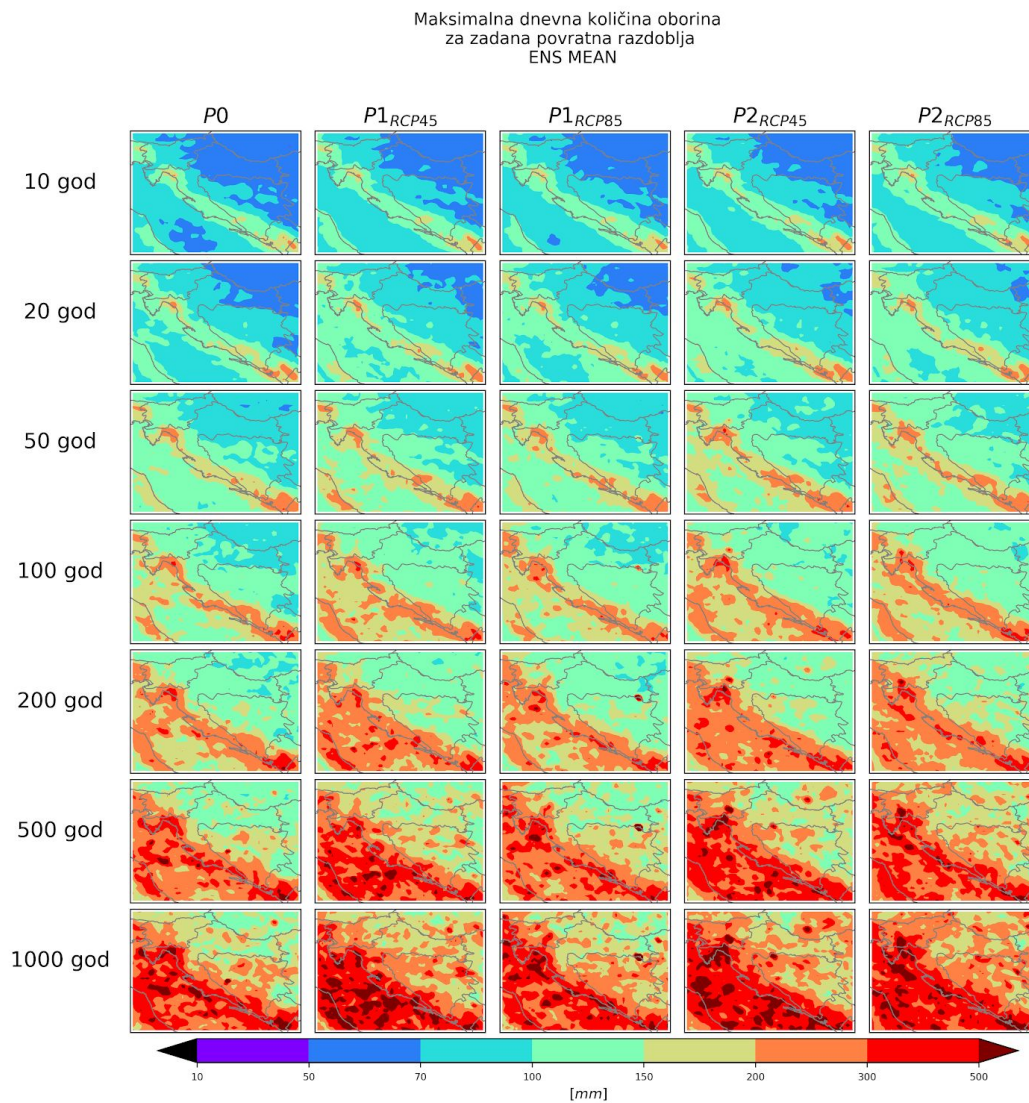
Gledajući medijan ansambla maksimalne dnevne količine oborine, promjene na kontinentu i obali pokazuju manji prostorni raspon vrijednosti (polje je izglađenije) nego što je to slučaj ako se promatra srednjak ansambla pri čemu je raspon prostornih vrijednosti veći. Ova pristranost srednjaka rezultat je procjena količina oborine samo jednog člana ansambla (npr. *HadGEM*). Prikazom srednjaka i medijana ansambla 12 korištenih modela želimo upravo provjeriti koliko su simulirane promjene robusne na način definiranja tražene informacije iz čitavog skupa simulacija. I u slučaju medijana na kontinentalnom dijelu domene promjene su slabije izraženije 150 – 200 mm u odnosu na obalno područje 300 – 500 mm. Ta razlika je evidentna za razdoblje P2, scenarij RCP8.5. Razlika između vrijednosti srednjaka ansambla maksimalne godišnje količine oborine za zadana povratna razdoblja iz primijenjenih regionalnih modela tijekom P0 te budućih P1 i P2 razdoblja, ukazuje na porast iznad obalnog područja s povećanjem povratnog razdoblja (1000 godina, do 200%, Slika 3.3.3 – Slika 3.3.4). Iznad kontinentalnog predjela domene tijekom razdoblja P1 javlja se blago smanjenje ekstremne količine oborine (izraženije za scenarij RCP8.5, 20-50 %). Tijekom razdoblja P2, povećanjem povratnog razdoblja, ekstremna količina oborine na kontinentalnom predjelu domene povećava se u planinskim predjelima (75 - 100 %), a smanjuje u nizinama (20 – 50 %). U odnosu na srednjak ansambla relativnih razlika između P0 i P1 odnosno P2 razdoblja, medijan smanjuje i ublažuje iznos razlika, no pokazuje isti predznak povećanjem zadanih povratnih razdoblja (Slika 3.3.3 i Slika 3.3.4). S obzirom na izraženu prostornu promjenjivost u signalu klimatskih promjena za ovako definirane ekstremne količine oborine na godišnjoj skali (posebno za duga povratna razdoblja), preporuka je razmatrati općenite promjene na širem području (a ne za specifičnu lokaciju ignorirajući informaciju na susjednom području).



Slike 3.3.5 – 3.3.8. prikazuju vrijednosti ekstremnih količina oborine za zadana povratna razdoblja koja su definirana za pojedinu sezonu (konkretno, odabiremo prilikom prilagodbe na GEV razdiobu maksimalne vrijednosti iz pojedine sezone tijekom razdoblja od 30 godina). Tijekom zime (DJF; Slika 3.3.5), iznosi ekstremne sezonske količine oborine kreće se u intervalu do 50 mm nad kontinentalnim dijelom domene, dok se na širem obalnom području za povratna razdoblja dulja od 50 godina pojavljuju vrijednosti i preko 100 mm. Tijekom ljetnih mjeseci (JJA; Slika 3.3.6), sezonska količina oborine najveća je tijekom godine i iznosi od 200 do 300 mm iznad kontinentalnog dijela, odnosno iznad 300 mm iznad priobalnog područja (izraženije u P2 razdoblju za scenarij RCP8.5). Tijekom proljeća (MAM; Slika 3.3.7), količine oborine povećane su u odnosu na zimski dio godine, no manje u odnosu na ljetni. Maksimalna dnevna količina oborine od 200 do 300 mm rasprostire se uglavnom iznad planinskog predjela, dok su nad nizinskim dijelom domene maksimalne sezonske količine oborine uglavnom od 70 do 100 mm te u manjem djelu od 100 do 200 mm. Promjene su također izraženije za P2 razdoblje, scenarij RCP8.5 Jesenski dio godine (SON; Slika 3.3.8) pokazuje sličnu raspodjelu kao i proljetni dio, samo se količine od 200 do 300 mm rasprostiru uglavnom iznad cijelog kopnenog dijela domene. Do povratnog razdoblja od 200 god, evidentna je razlika u količini oborine iznad kopnenog (70 – 100 mm) i obalnog područja (100 – 200 mm).

Relativne razlike između P1 i P2 razdoblja u odnosu na P0 razdoblje za sve sezone prikazane su na Slikama 3.3.9 – 3.3.12. Tijekom zimskog dijela (Slika 3.3.9) postoji blago negativno odstupanje za oba scenarija P1 razdoblja za sva zadana povratna razdoblja u odnosu na P0 razdoblje (do 20 %). Tijekom P2 razdoblja modeli projiciraju blagi porast ekstremnih količine oborine iznad kopna i smanjenje iznad obalnog dijela. Gradijenti su malo veći u slučaju scenarija RCP8.5. Tijekom ljetnog dijela godine (Slika 3.3.10), također postoji blago smanjenje količine oborine u P1 razdoblju, povećanjem povratnog razdoblja, međutim u manjoj mjeri (prisutno na kontinentalnim dijelovima). Tijekom P2 razdoblja, povećanja količine oborine u odnosu na P0 razdoblje (50 do 200 %), povećanjem povratnog razdoblja dominira nad cijelom domenom, izuzev na sjevernom Jadranu gdje se javlja smanjenje maksimalne količine oborine (do 20 %). Tijekom proljetnog (Slika 3.3.11) i jesenskog razdoblja (Slika 3.3.12), prostorna razdioba povećanja i smanjenja oborine slična je zimskom dijelu. Gradijenti su manji u odnosu na zimski i ljetni dio godine, i povećanjem povratnog razdoblja povećavaju se na 20 % (kontinentalni dio izuzev istočne Slavonije) za P1 razdoblje te uz povećanje od 70 % uglavnom za obalno područje za proljetni dio godine. Tijekom jesenskog dijela, gradijenti su slični, no prostorno postoje razlike. Smanjenje maksimalne količine oborine dominira za razdoblje P1 (do 20 %), dok je za P2 razdoblje

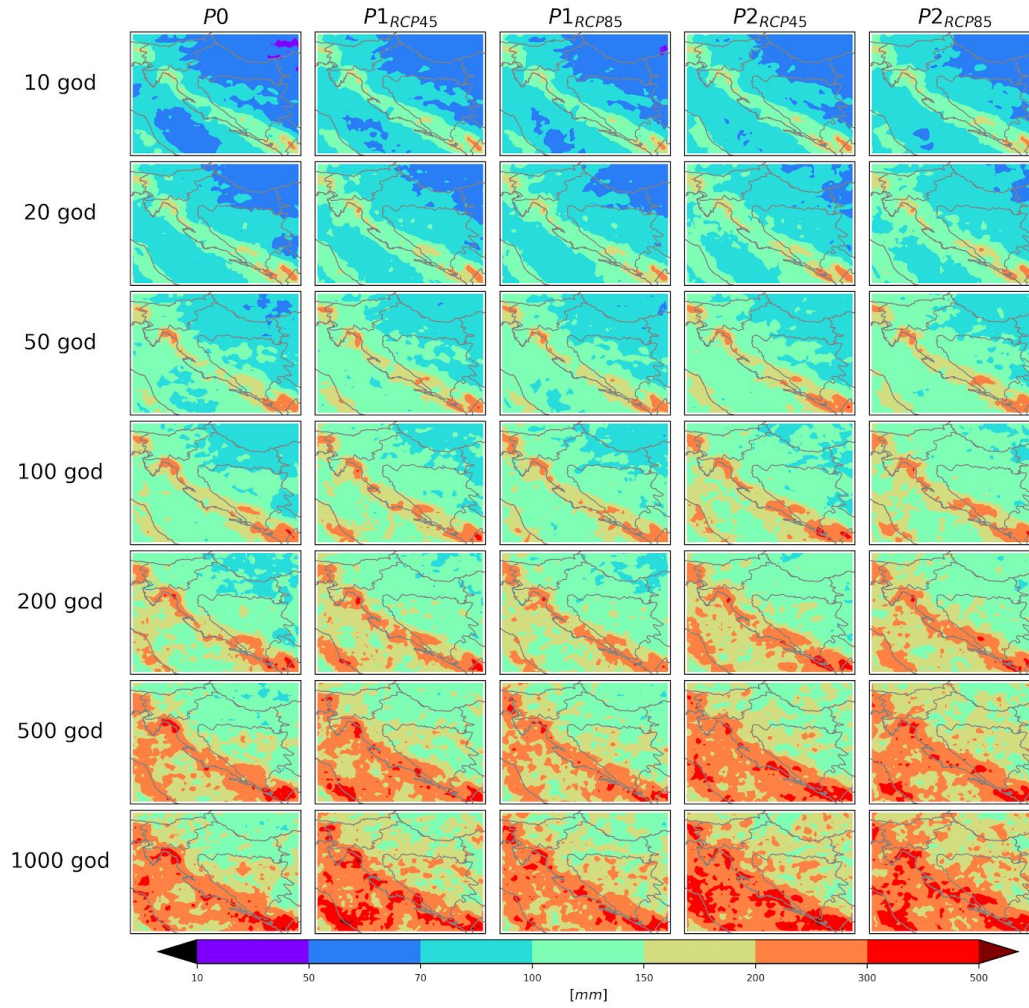
prisutno povećanje od 75 do 100 %, izuzev sjevernog Jadrana. Kao i za slučaj ekstremnih količina oborine za zadana povratna razdoblja na godišnjoj razini, promjene na sezonskim razinama često uključuju izraženu prostornu promjenjivost te je i ovdje preporuka uzeti u obzir informaciju o mogućim klimatskim promjenama na širem području. U slučaju da je potrebna informacija za manji podsliv ili lokaciju, potrebno je analizirati prošireni ansambl regionalnih klimatskih modela.



©DHMZ SK

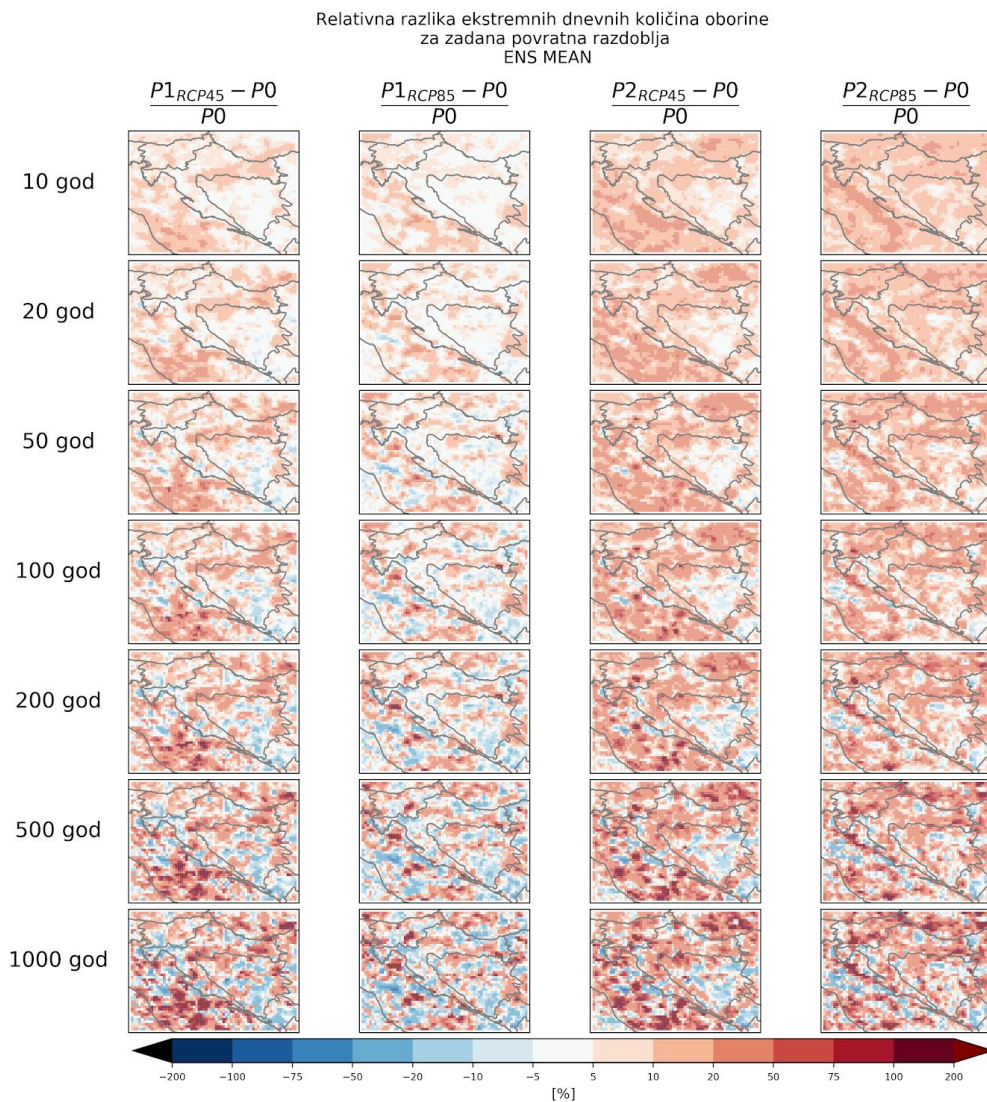
**Slika 3.3.1** Maksimalna dnevna količina oborina za zadana povratna razdoblja (10, 20, 50, 100, 200, 500 i 1000 godina) koja se javila tijekom razdoblja P0 (srednjak ansambla klimatskih modela; 1. stupac), P1 (za scenarije RCP4.5 i RCP8.5; 2. i 3. stupac) i P2 (za scenarija RCP4.5 i RCP8.5; 4. i 5. stupac)

Maksimalna dnevna količina oborina  
za zadana povratna razdoblja  
ENS MEDIAN

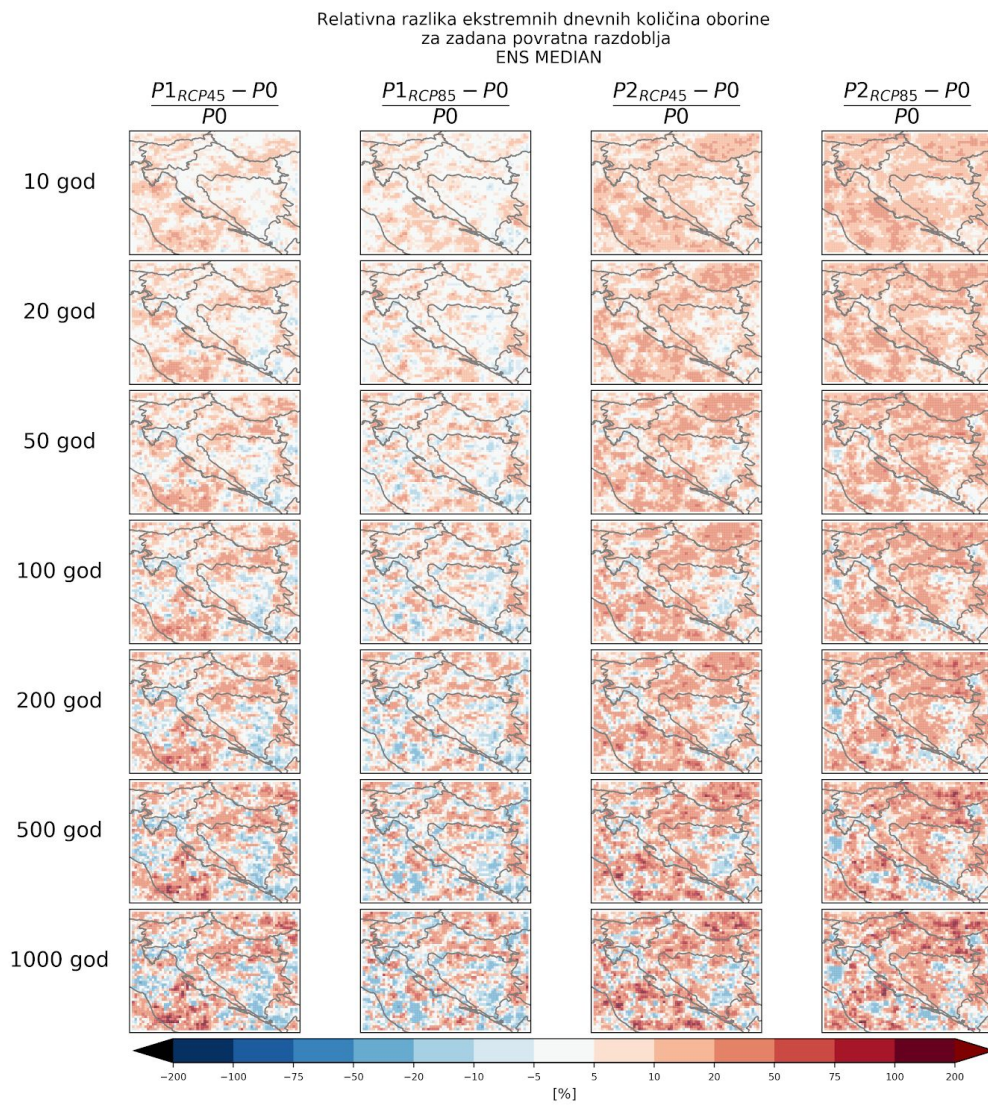


©DHMZ SK

**Slika 3.3.2** Kao Slika 3.3.1 no polja su definirana kao medijan 12 simulacija.

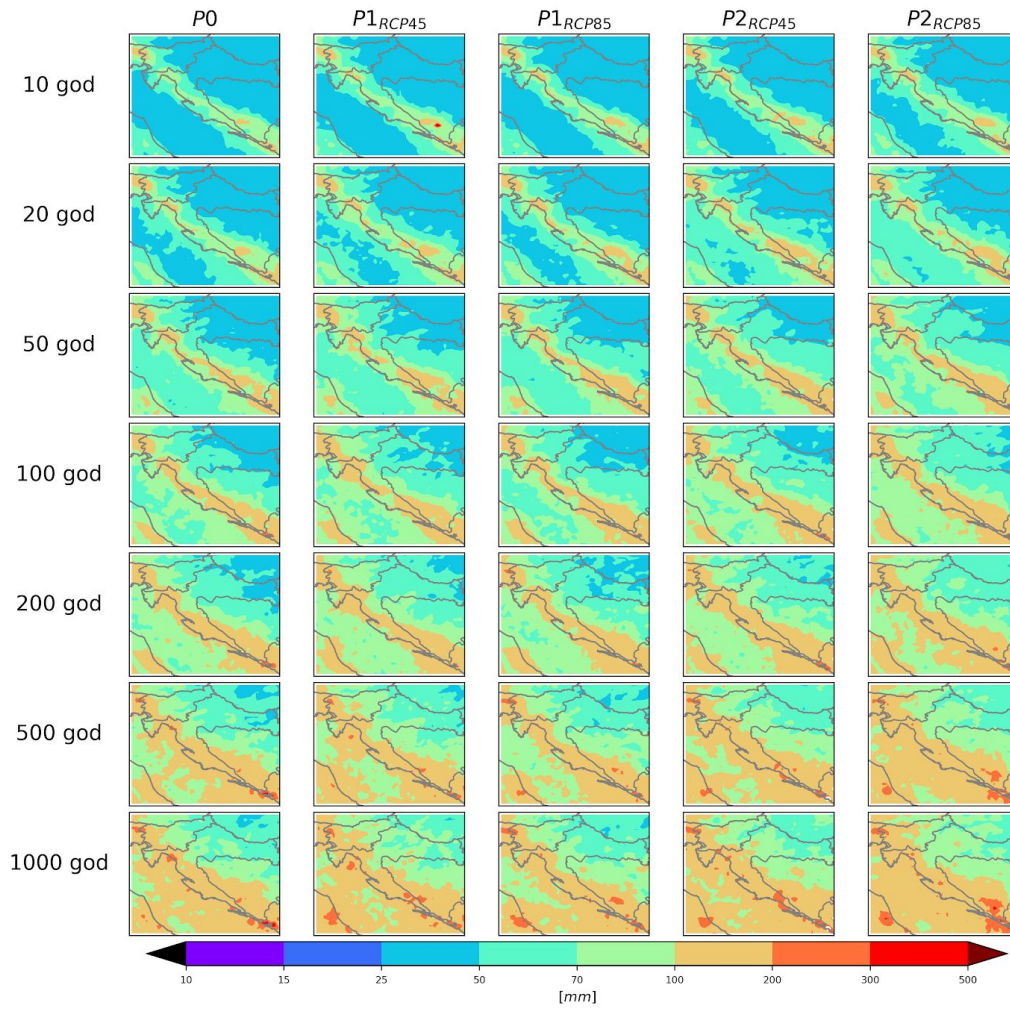


**Slika 3.3.3** Relativna razlika ekstremnih dnevnih količina oborine za zadana povratna razdoblja (10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000 godina) koja se javila tijekom P0, P1 i P2 razdoblja (srednjak ansambla klimatskih modela) korištenjem scenarija RCP4.5 (1. i 3. stupac) i RCP8.5 (2. i 4. stupac).



**Slika 3.3.4** Kao Slika 3.3.3 no polja su definirana kao medijan 12 simulacija.

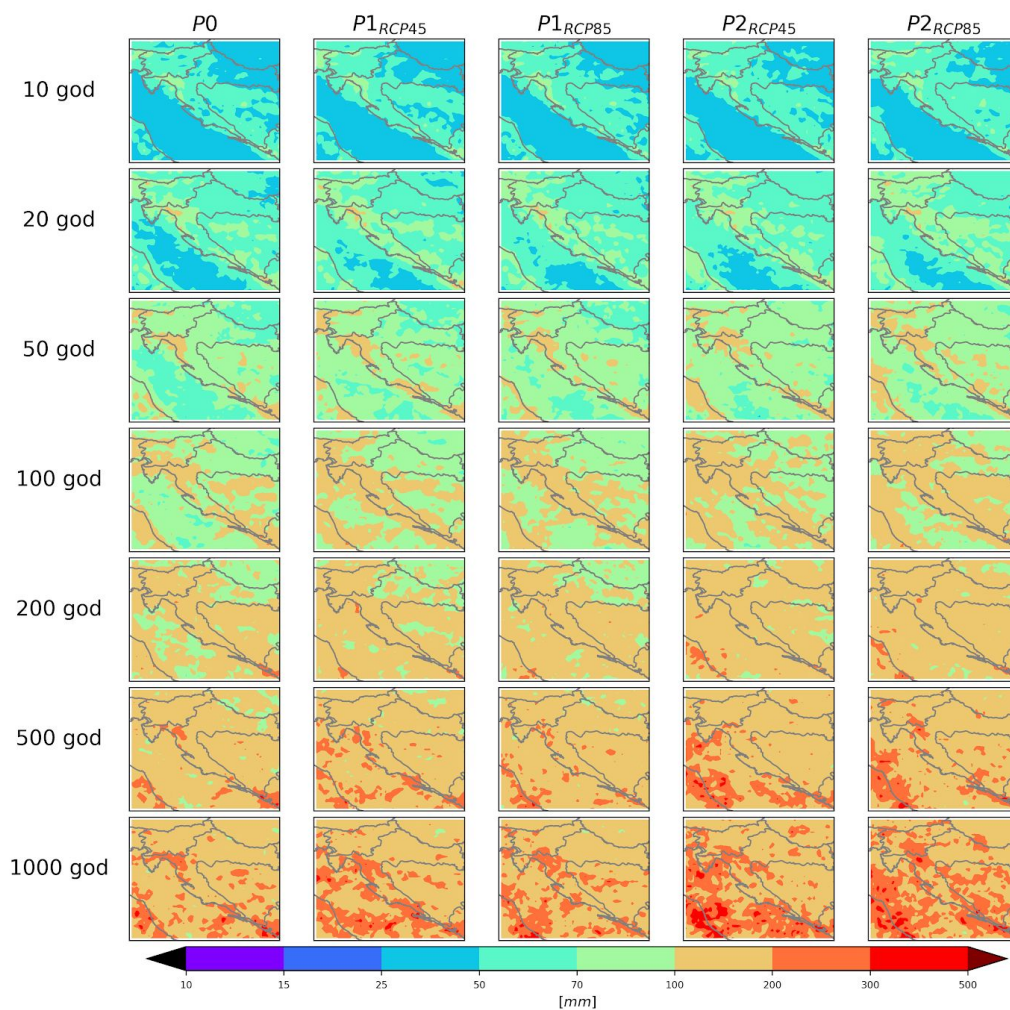
Maksimalna dnevna količina oborina  
za zadana povratna razdoblja  
Sezona: DJF; ENS MEDIAN



©DHMZ SK

**Slika 3.3.5** Kao Slika 3.3.1 no na temelju zimskih količina oborine.

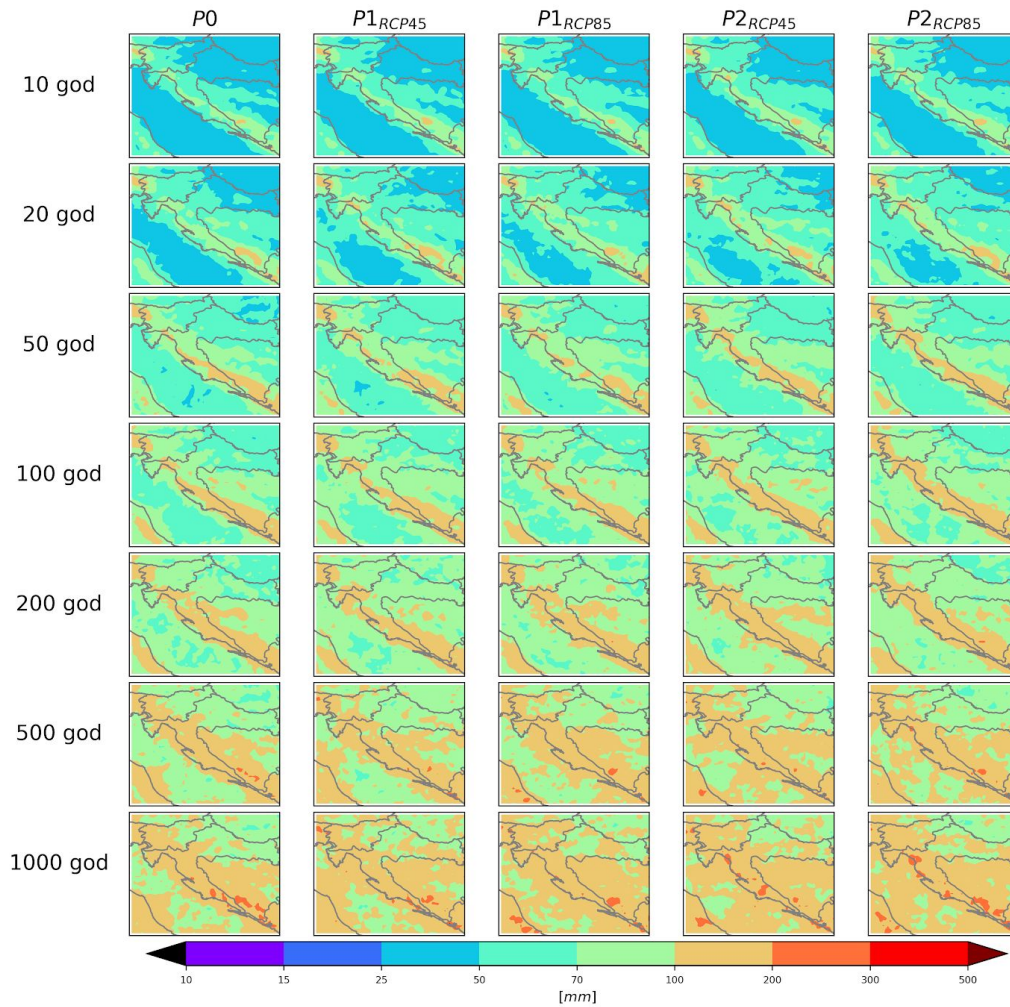
Maksimalna dnevna količina oborine  
za zadana povratna razdoblja  
Sezona: JJA; ENS MEDIAN



©DHMZ SK

Slika 3.3.6 Kao Slika 3.3.1 no na temelju ljetnih količina oborine.

Maksimalna dnevna količina oborina  
za zadana povratna razdoblja  
Sezona: MAM; ENS MEDIAN

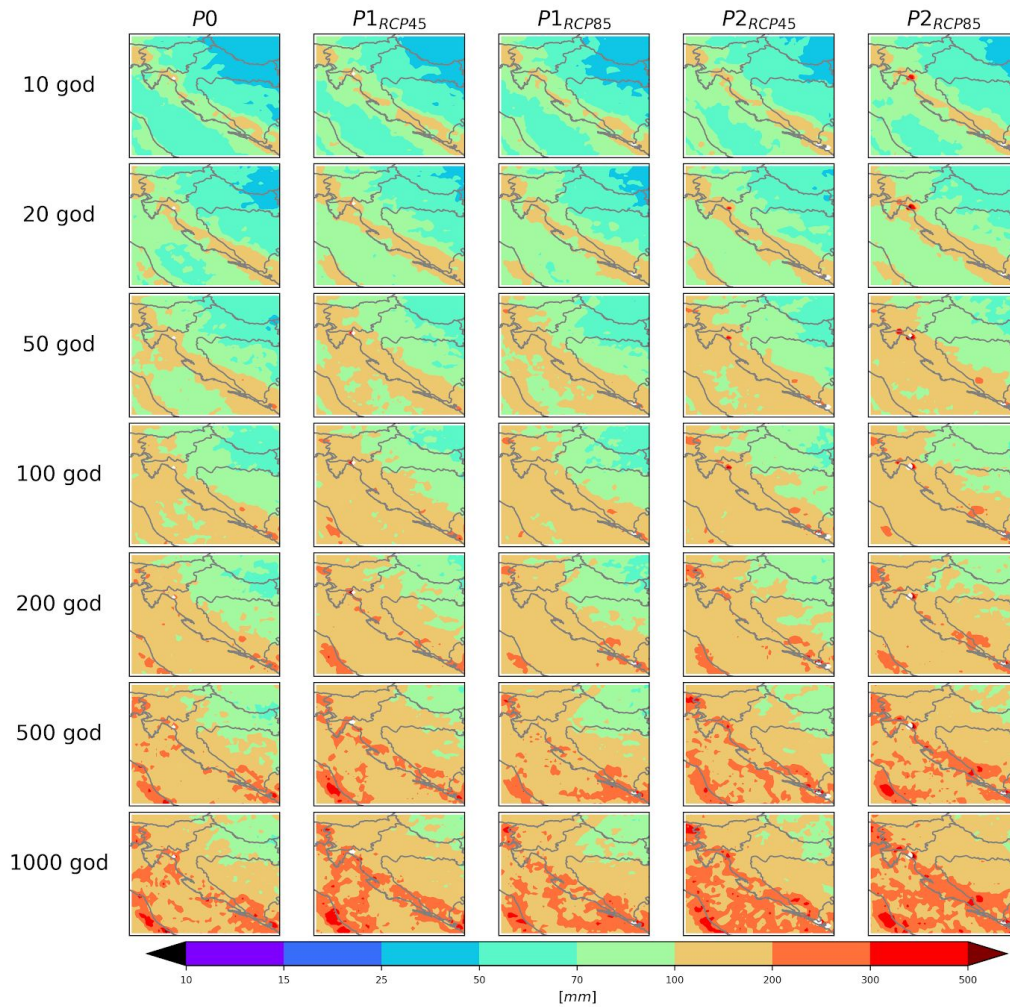


©DHMZ SK

Slika 3.3.7 Kao Slika 3.3.1 no na temelju proljetnih količina oborine.

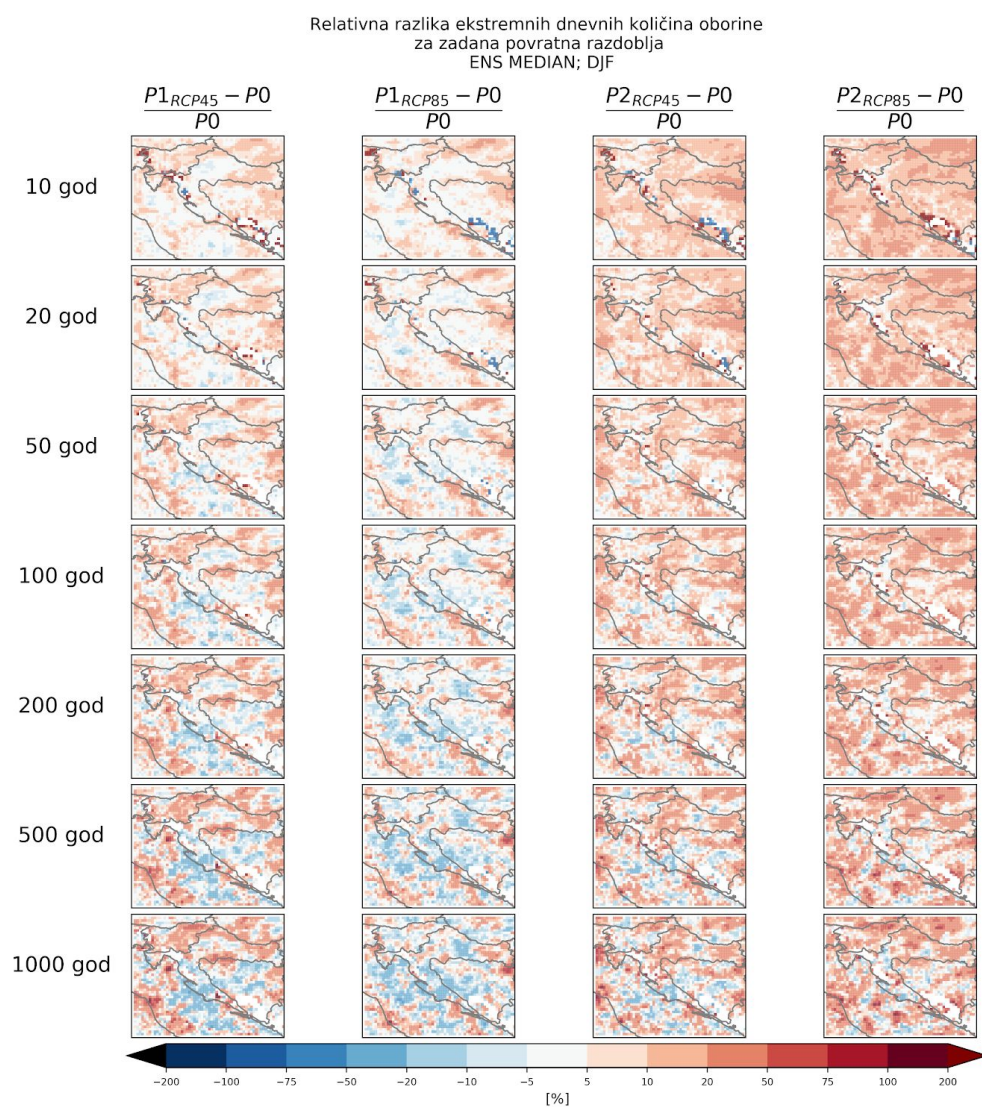


Maksimalna dnevna količina oborina  
za zadana povratna razdoblja  
Sezona: SON; ENS MEDIAN

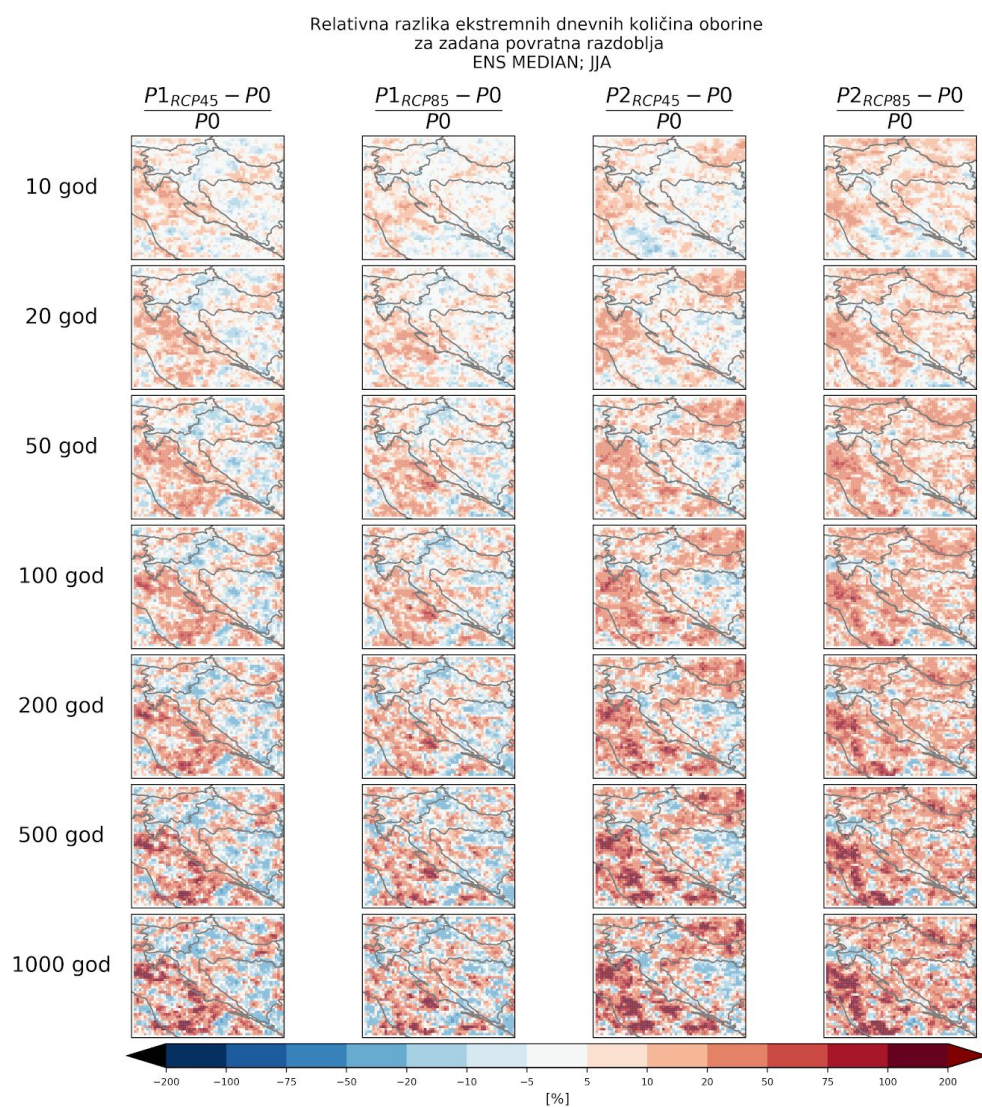


©DHMZ SK

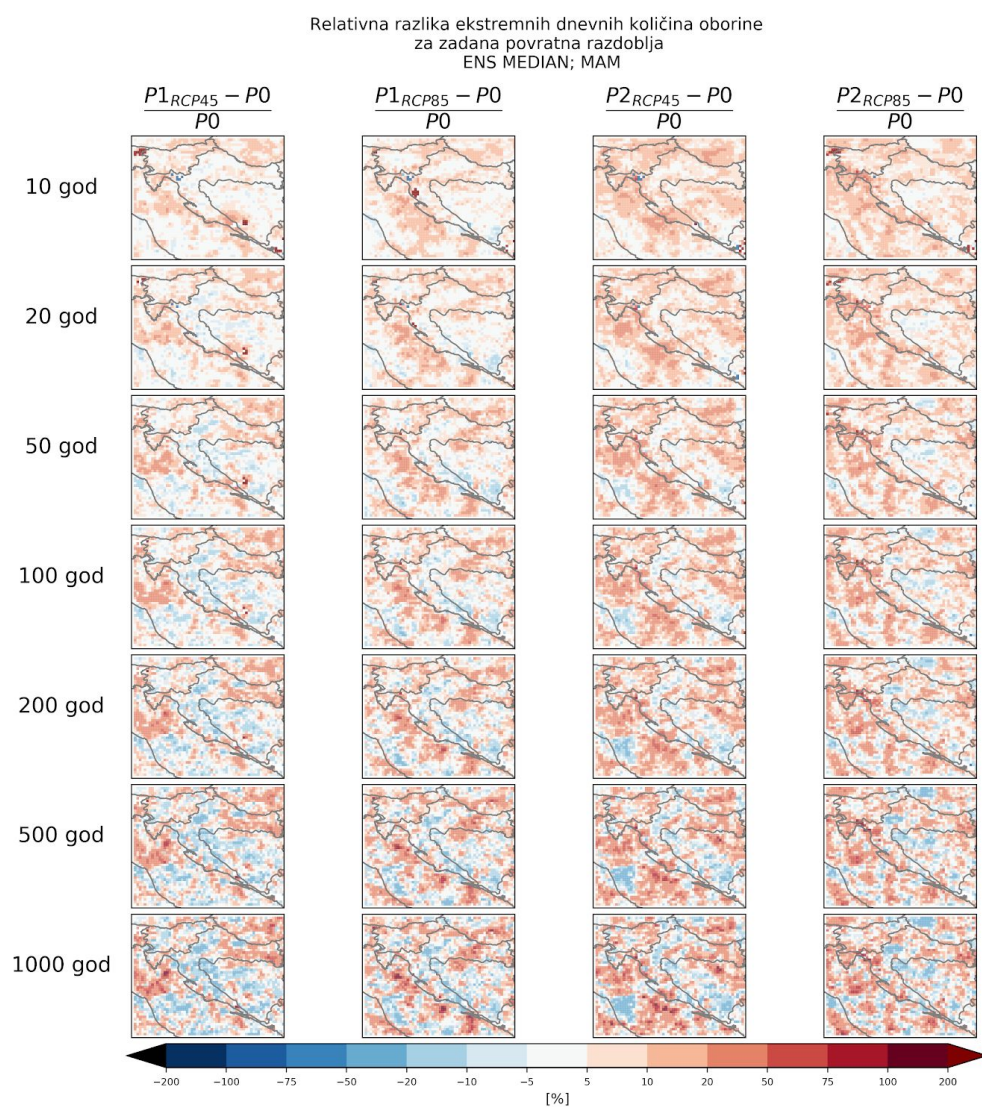
**Slika 3.3.8** Kao Slika 3.3.1 no na temelju jesenskih količina oborine.



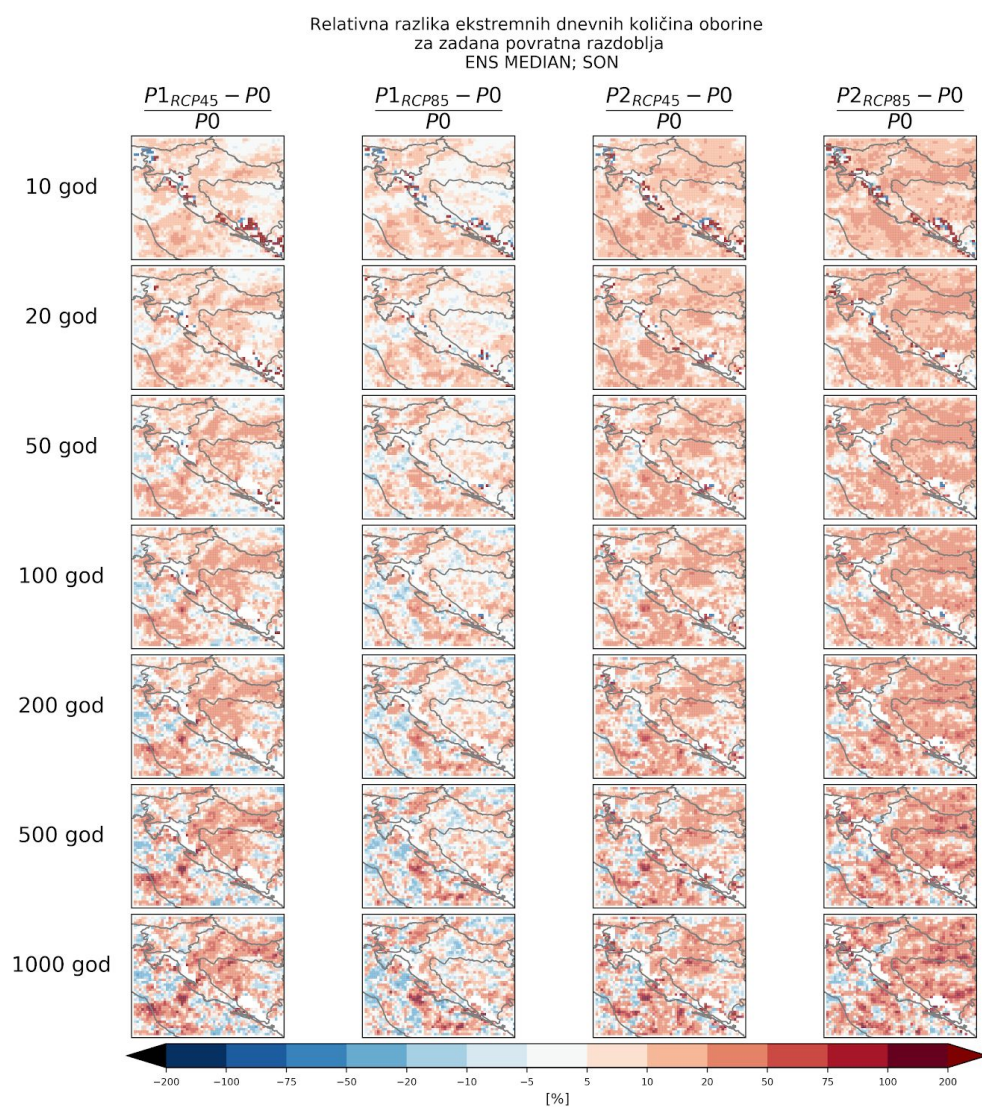
**Slika 3.3.9** Kao Slika 3.3.4 za zimske količine oborine.



Slika 3.3.10 Kao Slika 3.3.4 za ljetne količine oborine.



Slika 3.3.11 Kao Slika 3.3.4 za proljetne količine oborine.



**Slika 3.3.12** Kao Slika 3.3.4 za jesenske količine oborine.

### 3.4 Dodatni parametri: srednja razina mora i brzina vjetra na 10 m

Cilj ovog potpoglavlja je dati sažeti pregled rezultata informacija vezanih za moguće promjene u srednjoj razini mora te promjene u brzini vjetra na 10 m. Prikazani rezultati nisu isključivo bazirani na regionalnim klimatskim modelima i scenarijima korištenim u ostatku ovog izvješća. Namjera je nadopuniti ranije prikazane rezultate s osnovnim informacijama važnim u kontekstu utjecaja klimatskih promjena u 21. stoljeću na vodno gospodarstvo i stanje voda.

#### *Srednja razina mora*

Tehničko izvješće<sup>4</sup> pripremljeno za potrebe izrade *Nacrta Strategije prilagodbe klimatskim promjenama* također daje generalni pregled mogućeg porasta srednje razine mora tijekom 21. stoljeća. Numeričke vrijednosti i metodološki detalji su sažeti u Tablici 3.4.1.

**Tablica 3.4.1** Promjena u srednjoj razini mora prema različitim procjenama

Izvor	Scenarij	Razdoblje	Iznos	Napomena
CMIP5 globalni klimatski model MPI-ESM	RCP4.5	2011.-2040. u odnosu na 1971.-2000.	Od 0 do 5 cm na području Jadrana.	Globalni klimatski modeli su primjeren alat za projekcije porasta razine mora na globalnoj razini. Specifični GCM ima relativno kvalitetno razlučen Jadran na svojoj numeričkoj mreži.
CMIP5 globalni klimatski model MPI-ESM	RCP4.5	2041.-2070. u odnosu na 1971.-2000.	Od 0 do 5 cm na području Jadrana.	
IPCC (2013)	Opažene vrijednosti	Promjena u razdoblju 1971.-2010.	8 cm globalni porast	-

4

<http://prilagodba-klimi.hr/wp-content/uploads/2019/05/Rezultati-klimatskog-modeliranja-na-sustavu-HPC-Velebit.pdf>

21 CMIP5 GCM <sup>5</sup>	RCP4.5	2046.-2065. u odnosu na 1986.-2005.	Od 19 do 33 cm na globalnoj razini	Za razliku od otvorenog mora, u zatvorenom bazenu kao što je Sredozemlje s Jadranom, na razinu mora utječu promjene saliniteta (veći salinitet->smanjenje razine) i temperature (viša temperatura->porast razine) usporedivim doprinosom te promjene na području Jadrana mogu biti različite amplitude od globalnih promjena.
21 CMIP5 GCM	RCP8.5	2046.-2065. u odnosu na 1986.-2005.	Od 22 do 38 cm na globalnoj razini	
Orlić i Pasarić (2013)	B1	2000.-2100.	95±17 cm 74±15 cm 64±14 cm  Različite procjene na globalnoj razini ovisno o primijenjenoj metodi.	Prema rezultatima polu-empiričke metode.

Navedeno tehničko izvješće pripremljeno za potrebe izrade *Nacrta Strategije prilagodbe klimatskim promjenama* zaključuje “Premda ne postoji usuglašenost u navedenim procjenama buduće razine, moglo bi se zaključiti da bi do 2100. porast razine Jadrana bio između 40 i 65 cm.”

Dodatno, nedavno objavljen pregledni članak na temu razine mora na području Jadrana Vilibić i sur. (2017) daje procjenu o porastu od 49.7 cm do kraja 21. stoljeća, ako se uvažavaju procesi vezani za promjenu temperature i saliniteta mora. Do određenih modifikacija u ovom iznosu dolazi ovisno o tome uključuju li se u procjenu srednje razine mora procesi vezani uz direktno atmosfersko forsiranje te procesi vezani uz tektonske aktivnosti i vertikalno pomicanje tla. Zaključak Vilibić i sur. (2017) je da je za bolje procjene promjene u razini mora na području Jadrana na klimatski relevantnim vremenskim skalama potreban daljnji razvoj metoda dinamičke i statističke prilagodbe.

<sup>5</sup> <http://icdc.cen.uni-hamburg.de/1/daten/ocean/ar5-slr.html>

## *Prizemna brzina vjetra iznad Jadrana*

Uspješnost najnovije generacije regionalnih klimatskih modela u simuliranju polja prizemnog vjetra te njegove potencijalne promjene tijekom 21. stoljeća na području Jadrana detaljno je analizirano u radovima Belušić i sur. (2018) i Belušić Vozila i sur. (2018). Navedeni radovi uzimaju u obzir veliki broj simulacija regionalnih klimatskih modela, uključujući rezultate tri regionalna klimatska modela (RegCM4, RCA4i CCLM4) analizirana za potrebe ove studije.

Belušić i sur. (2018) su pokazali kako porast prostorne rezolucije RCM-ova s 50 km na 12.5 km pospješuje sposobnost istih modela za simulaciju polja prizemnog vjetra (na 10 m) u područjima s razvijenom orografijom i složenom obalom kao što je jadransko područje. U istom radu su analizirane i simulacije na 2.2 km (samo za jedan RCM) te smo u fazi razvoja sličnih mogućnosti na DHMZ-u koristeći noviju i napredniju verziju modela RegCM.

Belušić Vozila i sur. (2018) koriste rezultate EURO-CORDEX i RegCM4 projekcija na 12.5 km te koristeći dva scenarija (RCP4.5 i RCP8.5) za analizu mogućih promjena u buri i jugu tijekom 21. stoljeća. Ova analiza je pokazala da je signal klimatskih promjena smanjen u odnosu na varijable kao što su temperature zraka i ukupna količina oborine, no analiziran skup (ansambl) simulacija ukazuje na sljedeće mogućnosti:

1. Smanjenje broja dana s burom zimi.
2. Povećanje broja dana s jugom zimi (posebno na području srednjeg Jadrana).
3. Smanjenje brzine vjetra u danima s burom zimi (osim na sjevernom Jadranu gdje modeli ukazuju na mogućnost povećanja ~ 2 m/s).
4. Smanjenje brzine vjetra u danima s jugom zimi.
5. Povećanje broja dana s manjim brzinama vjetra (povezanim s termalno induciranim strujanjima) ljeti.
6. Generalno smanjenje ekstremnih brzina (definiranih kao 99.-ti percentil unutar zadanog razdoblja na temelju srednjih dnevnih brzina vjetra na 10 m) na području Jadrana zimi i ljeti u razdobljima 2011.-2040., 2041.-2070., 2071.-2099. u odnosu na 1971.-2000. Očekivane promjene imaju izraženu prostornu varijaciju iznosa promjene. Za ljeto isti RCM-ovi daju mogućnost povećanja ekstremnih brzina vjetra na području Kvarnerskog zaljeva i širem području Velebitskog kanala i to u iznosu od ~5 %.



## 4. Zaključak

U ovom dijelu izvješća dane su informacije vezane za ugovornu obvezu: *Predložiti meteorološke metodološke aspekte primjene rezultata klimatskog modela za potrebe odgovarajućih hidroloških i vodnogospodarskih analiza*

Analiza regionalnih klimatskih simulacija dobivenih pomoću tri regionalna modela koja su forsirana s četiri globalna klimatska modela pod pretpostavkom dva moguća razvoja scenarija stakleničkih plinova jasno pokazuje na porast temperature na cijeloj promatranoj domeni u oba promatrana buduća razdoblja. Porast temperature zraka se očekuje do 1.4 °C za RCP4.5 te 1.7 °C za RCP8.5 scenarij u P1 klimi u ljetnim mjesecima. Sredinom stoljeća će porast biti nešto izraženiji, uz najveće amplitude ljeti (2.5 °C za RCP4.5 i 3.1 °C za RCP8.5 scenarij).

Gledano posebno po vodnim područjima, u budućnosti će jadransko vodno područje u toplom dijelu godine (od travnja do studenog) imati nešto veći porast temperature u usporedbi s područjem podsliva rijeke Save te područjem podsliva rijeka Drave i Dunava. U hladnom dijelu godine vrijedi obrnuto, jadransko vodno područje će se zagrijati nešto manje nego podslivovi rijeka u unutrašnjosti zemlje. Usporedba podsliva rijeke Save i podsliva rijeka Drave i Dunava pokazuje da se podsliv rijeke Save zagrijava malo više nego podsliv rijeka Drave i Dunava, i to u P2 klimi za veći broj mjeseci u godini.

Smanjenje oborine prisutno na području cijele domene očekuje se uglavnom u toplijem dijelu godine, između 0.3 % i 12.6 % u P1 za RCP4.5, te 1.8 % i 15.0 % za RCP8.5. Slično smanjenje oborine se očekuje i u P2 klimi, od 0.2 % do 17.2 % za RCP4.5 te 0.6 % do 15.1 % za RCP8.5. U ostalim mjesecima očekuje se povećanje oborine.

Usporedba promjene količine oborine po vodnim područjima pokazuje da će u mjesecima kada se očekuje povećanje oborine (uglavnom u hladnijem dijelu godine) povećanje biti manje na jadranskom vodnom području nego na području podsliva rijeka Drave i Dunava. Ljeti, kada se očekuje smanjenje oborine, ono će biti veće na jadranskom vodnom području nego na području podsliva rijeke Drave i Dunava. Slično vrijedi i za usporedbu jadranskog vodnog područja i područja podsliva rijeke Save. Usporedba područja podsliva rijeke Save i područja podsliva rijeka Drave i Dunava daje pretežno veće povećanje oborine na području podsliva rijeka Drave i Dunava u hladnijem dijelu godine. Također se na području podsliva rijeka Drave i Dunava očekuje manje smanjenje oborine u

ljetnim mjesecima. Ovo je u skladu s prostornom raspodjelom promjene količine oborine. Smanjenje oborine (u toplijem dijelu godine) se povećava od sjevera prema jugu, dok obrnuto vrijedi za povećanje oborine (u hladnijem dijelu godine) koje je jače izraženo na sjeveru nego na jugu zemlje.

Promjena evapotranspiracije u budućoj klimi će slično kao i oborina, imati smanjenje u ljetnim mjesecima, dok će u ostatku godine rasti. Promjene koje se očekuju su između -2.9 % (rujan) i 19.8 % (siječanj) za RCP4.5, -3.7 % (rujan) i 15.0 % (siječanj) za RCP8.5 u P1 klimi. U P2 klimi se promjene evaporacije kreću između -10.2 % (rujan) i 25.8 % (siječanj) za RCP4.5, -3.1 % (rujan) i 32.1 (siječanj) za RCP8.5.

Usporedba promjene evapotranspiracije po slivnim područjima pokazuje uglavnom manje povećanje evapotranspiracije na jadranskom vodnom području (njegovom kopnenom dijelu) nego na području podsliva rijeka Drave i Dunava u hladnom dijelu godine. Na jadranskom vodnom području se smanjenje evapotranspiracije očekuje samo u srpnju i kolovoza, za razliku od područja podsliva rijeka Drave i Dunava gdje se smanjenje očekuje od kolovoza do listopada. Na području podsliva rijeke Save se smanjenje evapotranspiracije može očekivati od srpnja do listopada. Budući na prostornu varijabilnost predznaka promjene, otežano je dati generalan zaključak te je potrebno analizirati specifična područja odvojeno.

Promjena ukupnog otjecanja u budućoj klimi je uz promjenu oborine najvarijabilniji parametar. U P1 se očekuje promjena ukupnog otjecanja između -10.0 % (kolovoz) i 12.5 % (siječanj) za RCP4.5, -11.3 % (kolovoz) i 8.9 % (siječanj, studeni) za RCP8.5. U P2 se očekuje promjena ukupnog otjecanja između -18.7 % (kolovoz) i 15.8 % (siječanj) za RCP4.5, -17.3 % (kolovoz) i 13.4 % (siječanj) za RCP8.5. Dok za cijelu domenu smanjenje ukupnog otjecanja u P2 klimi i uz RCP8.5 scenarij traje kontinuirano od ožujka do listopada i u prosincu, gledano po pojedinim slivovima slična je situacija samo za jadransko vodno područje. Za to je vodno područje smanjenje ukupnog otjecanja prisutno od travnja do kolovoza i u listopadu, za područje podsliva rijeke Save u travnju, od lipnja do kolovoza i u prosincu, te za područje podsliva rijeka Drave i Dunava u kolovoza. U mjesecima kada se javlja povećanje ukupnog otjecanja, ono je uglavnom u hladnijem dijelu godine veće na jadranskom vodnom području u usporedbi sa otjecanjem na području podsliva rijeke Save. Isto ne vrijedi i za podsliv rijeka Drave i Dunava koje koji ima veće povećanje otjecanja nego jadransko vodno područje. Općenito, zbog velike prostorne promjenjivosti i različitih predznaka promjene ukupnog otjecanja u pojedinim mjesecima na pojedinim slivovima

otežano je donijeti jedinstveni zaključak o promjeni ukupnog otjecanja te je potrebno analizirati svako specifično područje odvojeno. Naglašavamo da je analizirano polje ukupnog otjecanja varijabla koju je potrebno dodatno uzeti u fokus u budućim istraživanjima. Zbog svoje važnosti i složenosti procesa, nužno je povećati veličinu ansambla s alternativnim regionalnim klimatskim modelima te obaviti specifičnu analizu na manjim podslivovima.

U izvješću su prikazani rezultati metode za analizu ekstremnih količina oborine. Za svaku točku domene, te za svaku od 12 simulacija određena je prilagodba maksimalnih dnevnih količina oborine unutar godine ili sezone na opću razdiobu ekstremnih vrijednosti (GEV). Dani su prikazi punih polja i relativnih razlika za zadana povratna razdoblja. Rezultati upućuju na najintenzivnija povećanja u ekstremnoj oborini tijekom ljeta (u istoj sezoni kada se srednja sezonska količina oborine smanjuje) te jačanje signala u drugom dijelu 21. stoljeća (P2: 2041.-2070.) i to posebno u ekstremnijem scenariju (RCP8.5). Generalna tendencija jest da se količine oborine povećavaju za sva zadana povratna razdoblja (također u P2 uz RCP8.5). Za ranije razdoblje P1, analizu je potrebno fokusirati na specifični podsliv i proširiti dodatnim klimatskim projekcijama kako bi se kompletnije opisao omjer signala (koji dolazi od klimatskih promjena) i šuma (koji dolazi od prirodne varijabilnosti).

Rezultati su nadopunjeni osnovnim pregledom najnovijih procjena promjena u srednjoj razini mora (globalna i na području Jadrana) te brzine prizemnog vjetra (na području Jadrana).

U ovom dijelu izvješća dane su informacije vezane za ugovornu obvezu: *Predložiti daljnje aktivnosti na analizi klimatskih promjena za potrebe vodnog gospodarstva*. Na temelju ovdje obavljene analize, moguće je predložiti dvije skupine aktivnosti.

## 1. Aktivnosti koje će adresirati ograničenja u metodologiji primijenjenoj u ovoj studiji

### a. *Povećanje prostorne rezolucije*

Korištena rezolucija od 12.5 km je trenutno aktualan pristup u istraživanju i primjeni baziranoj na korištenju skupova (tj. ansambla) regionalnih klimatskih modela koje koriste europski znanstvenici i istraživačke grupe. Dodatni

napori se ulažu u razvoj združenih regionalnih modela mora i atmosfere te klimatskih modela na prostornim rezolucijama od 1 do 4 km. Očekujemo u sljedećih 3 do 5 godina mogućnost pristup prvim skupovima regionalnih klimatskih simulacija visoke prostorne rezolucije. U jednoj od inicijativa koje za cilj imaju razvoj ovakvih sustava, *CORDEX FPS Convection*, sudjeluju i klimatolozi DHMZ-a. Na prostornim rezolucijama od 1 do 4 km počinjemo u klimatskim modelima dobivati fine strukture u obalnom području kao što su veći otoci.

*b. Analiza dodatnih scenarija*

Scenarij koncentracija stakleničkih plinova pod čijom pretpostavkom je moguće zadržati zagrijavanje ispod 1.5 °C, tzv. scenarij RCP2.6, moguće je dodatno analizirati. U tom slučaju matrica kombinacija RCM i GCM modela ne bi bila popunjena za sve kombinacije te bi bili korišteni alternativni RCM-ovi. Neovisno o ovome, u prilici bismo bili dati procjene o klimatskim promjenama u varijablama od interesa na području Republike Hrvatske u slučaju agresivnog smanjenja globalnih emisija stakleničkih plinova.

*c. Primjena većeg ansambla RCM simulacija*

Ukoliko se u narednom razdoblju javi potreba za analizom mogućih klimatskih promjena na manjem slivu ili lokaciji, preporučamo korištenje svih dostupnih RCM-GCM kombinacija kroz EURO-CORDEX te dodatno Med-CORDEX inicijative. Razlog tome je što za manje prostorne cjeline, signal klimatskih promjena prati izražena varijabilnost te je preporuka korištenje što većeg ansambla RCM simulacija kako bi se što potpunije dokumentirali izvori nepouzdanosti. Za veća područja (npr. slivovi u ovoj studiji) prostornim usrednjavanjem dolazi do filtriranja varijabilnosti unutar zadanog područja ili sliva te jasnije separacije između signala i šuma.

*d. Napredne mogućnosti RCM-ova u simuliranju hidrološkog ciklusa*

Postoji potreba za dodatnom analizom i naprednijim metodama simuliranja ukupnog otjecanja. Također, potrebno je demonstrirati mogućnost naprednijih modula unutar regionalnih klimatskih modela za simuliranja hidrološkog ciklusa u složenim i osjetljivim sustavima kao što je krš. Naprednije mogućnosti regionalnih klimatskih modela imaju potencijal

omogućiti detaljniju analizu na prostorno manjim podslivovima te razvoj i testiranje vodnogospodarskih strategija.

## 2. Aktivnosti koje će proširiti metodologiju primijenjenu u ovoj studiji

### a. *Nove varijable i izvedene veličine*

Fokus ove analize bili su vremenski srednjaci (te ansambl srednjaci i/ili medijani) četiri zadane varijable (temperatura zraka na 2 m, ukupna količina oborine, ukupno otjecanje i evapotranspiracija). Istovrsnu analizu moguće je napraviti na dodatnim varijablama (npr. veličine vezane za tokove energije i vode, dinamičke veličine kao što su brzina vjetra i tlak itd). Također, iz osnovnih klimatskih veličina, moguće je ovisno o potrebi pripremiti analizu izvedenih parametara (npr. distribucija kišnih i sušnih razdoblja).

### b. *Različiti statistički momenti u razdiobi simuliranih veličina*

Iako je fokus ove analize na vremenskim srednjacima unutar 30-godišnjih razdoblja, proširenje primijenjene metodologije može uključiti analizu ostalih statističkih momenata koji opisuju razdiobu. Npr., u slučaju temperature zraka standardna devijacija kao mjere međugodišnje varijabilnosti, odnosno koeficijent varijacije u slučaju ukupne količine oborine. Moguće je očekivati za pojedine slivove ili dijelove sliva da iako ne postoji značajna mogućnost promjene u srednjim godišnjim količinama oborine, ipak postoji mogućnost promjene u međugodišnjoj varijabilnosti iste veličine.

### c. *Statističko uklanjanje sustavnih pogrešaka i razvoj modela*

Analiza obavljena za potrebe ove studije je temeljena na izvornim izlazima regionalnih klimatskih modela. Jedno od ograničenja ovog tipa produkata jest postojanje sustavnih odstupanja od mjerenih vrijednosti. Ovo je karakteristika svih klimatskih modela te se korišteni modeli u ovoj studiji ne izdvajaju u negativnom ili pozitivnom smislu. Za varijable za koje postoji gusta mreža staničnih mjerenja i/ili polja interpolirana na pravilnu mrežu moguće je izvorne izlaze regionalnih klimatskih modela statistički obraditi i

približiti izmjerenim vrijednostima. Skup metoda za ovu problematiku uključuje različite tzv. *bias correction* ili *bias adjustment* algoritme. Potreba za ovakvom analizom se javlja u slučaju kada se rezultati regionalnih klimatskih modela žele primijeniti kao ulaz modelima u područjima utjecaja kao što su npr. modeli koji opisuju hidrološki ciklus na nekom slivu s uključenim većim brojem procesa (npr. riječni protoci). Alternativa je razvoj i testiranje naprednih modula unutar samih klimatskih modela (npr. nova shema za simulaciju procesa na površini koja uključuje napredne mogućnosti simuliranja hidroloških procesa). U praksi se oba pristupa koriste paralelno i dovode do znatnih poboljšanja u našim mogućnostima opisivanja hidroloških i klimatskih procesa i interakcija.

## Izvori podataka i zahvale

U izradi ove studije korištena su dva izvora podataka te izražavamo zahvale na otvorenom pristupu podataka:

1. RegCM4 simulacije dostupne preko baze Dabar (<https://repozitorij.meteo.hr/>):

*U izradi ovog dokumenta korišteni su rezultati regionalnog klimatskog modela RegCM4 dobiveni u sklopu projekta „Jačanje kapaciteta Ministarstva zaštite okoliša i energetike za prilagodbu klimatskim promjenama te priprema Nacrta Strategije prilagodbe klimatskim promjenama (Broj ugovora: TF/HR/P3-M1-O1-010)” koji se financira sredstvima iz Prijelaznog instrumenta tehničke pomoći EU.*

2. EURO-CORDEX simulacije dostupne preko baze ESGF (<https://esg-dn1.nsc.liu.se/projects/esgf-liu/>):

*We acknowledge the World Climate Research Programme's Working Group on Regional Climate and Working Group on Coupled Modelling, the former coordinating body of CORDEX, and the responsible panel for CMIP5. We also acknowledge the Earth System Grid Federation infrastructure, an international effort led by the U.S. Department of Energy's Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison, the European Network for Earth System Modelling, and other partners in the Global Organisation for Earth System Science Portals (GOESSP).*

# Popis skraćenica

CORDEX	<i>Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment</i>
CCLM4	Consortium for small scale modelling - Climate limited area Mode
CMIP5	Peta generacija <i>Coupled model intercomparison project</i>
DJF	Zima (engl. <i>December, January, February</i> )
ESGF	<i>Earth System Grid Federation</i>
EURO-CORDEX	Europska grana inicijative CORDEX
GCM	Globalni klimatski model (engl. <i>Global Climate Model</i> )
GEV	opća razdioba ekstremnih vrijednosti (eng. <i>Generalized Extreme Value distribution</i> )
IPCC	Međuvladin panel za klimatske promjene (eng. <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> )
JJA	Ljeto (engl. <i>June, July, August</i> )
MAM	Proljeće (engl. <i>March, April, May</i> )
P0	Razdoblje 1971.-2000. korišteno u ovoj studiji
P1	Razdoblje 2011.-2040. korišteno u ovoj studiji
P2	Razdoblje 2041.-2070. korišteno u ovoj studiji
RCP	reprezentativni scenarij koncentracije (engl. <i>Representative Concentration Pathway</i> )
RCA4	Rosby Centre regional atmospheric model
RCM	Regionalni klimatski model (engl. <i>Regional Climate Model</i> )
RegCM4	ICTP Regional Climate Model
SON	Jesen (engl. <i>September, October, November</i> )



# Dodatak

Podaci u prilogu (CD) razvrstani su u dva direktorija:

1. **Slike studija:** sadrži sve slike iz ove Studije vezane uz analizu rezultata klimatskih simulacija. Nomenklatura slika je kao i u Studiji, a razvrstane su u sljedećim poddirektorijima:

- 3.1 Prostorni prikaz klimatskih projekcija
- 3.2 Prostorni srednjaci za područja odabranih slivova
- 3.3 Maksimalna dnevna količina oborine za zadana povratna razdoblja

2. **Podaci:** sadrži *netCDF* datoteke sa podacima koji su služili kao podloga za analizu i vizualizaciju rezultata klimatskih simulacija. Datoteke su razvrstane u sljedećim poddirektorijima:

- 3.1 Prostorni prikaz klimatskih projekcija
  - CCLM4
  - RCA4
  - RegCM4

Nomenklatura datoteka označava koje podatke sadrži. Svaka datoteka sadrži sezonske srednjake analiziranih meteoroloških parametara, a razvrstana je prema različitom razdoblju, scenariju, regionalnom i globalnom modelu na način:

*Razdoblje-Scenarij\_Regonalni-model\_Globalni-model.nc*

- 3.2 Prostorni srednjaci za područja odabranih slivova
  - CCLM4
  - RCA4
  - RegCM4

Svaka datoteka sadrži mjesečne srednjake analiziranih meteoroloških parametara, nomenklatura datoteka kao i u prethodnom slučaju:

*Razdoblje-Scenarij\_Regonalni-model\_Globalni-model.nc*

- 3.3 Maksimalna dnevna količina oborine za zadana povratna razdoblja
  - Godina
  - Sezona

Nomenklatura datoteka označava koje podatke sadrži. Svaka datoteka sadrži medijan ansambla maksimalne dnevne količina oborina za različita povratna razdoblja u ovisnosti o različitom razdoblju i scenariju na način:

*GEV\_SEZONA\_Razdoblje-Scenarij.nc; GEV\_GODINA\_Razdoblje-Scenarij.nc*

# Literatura

Baldauf M, Schulz JP (2004) Prognostic precipitation in the Lokal-Modell (LM) of DWD. COSMO Newsletter 4: 177–180

Belušić A, M Telišman Prtenjak, I Güttler, N Ban, D Leutwyler, C Schär (2018) Near-surface wind variability over the broader Adriatic region: insights from an ensemble of regional climate models. *Climate Dynamics*, 50(11-12): 4455–4480

Belušić Vozila A, I Güttler, B Ahrens, A Obermann-Hellhund, M Telišman Prtenjak (2018) Wind over the Adriatic Region in CORDEX Climate Change Scenarios. *JGR: Atmospheres*, DOI: 10.1029/2018JD028552

Cuxart J, Bougeault P, Redelsperger J-L (2000) A turbulence scheme allowing for mesoscale and large-eddy simulations. *Quart J Roy Meteor Soc*, 126: 1–30

Dickinson RE, A Henderson-Sellers, PJ Kennedy (1993), Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) version 1E as coupled to the NCAR Community Climate Model. NCAR Tech. rep. TN-387+STR, 72 pp.

Doms G, Förstner J, Heise E, Herzog HJ, Raschendorfer M, Schrodin R, Reinhardt T, Vogel G (2007): A description of the non-hydrostatic regional model LM. Part II: Physical parameterization. [Available online at <http://www.cosmomodel.org/content/model/documentation/core/cosmoPhysParamtr.pdf>].

Giorgi F, Mearns LO (1991), Approaches to the simulation of regional climate change: A review. *Reviews of Geophysics*, 29(2): 191–216

Giorgi F (2019) Thirty years of regional climate modeling: Where are we and where are we going next? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124: 5696–5723

Grell GA (1993), Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations. *Monthly Weather Review*, 121: 764–787

Güttler I, T Stilinović, L Srnec, Č Branković, E Coppola, F Giorgi, 2019: Performance of EURO-CORDEX regional climate models over Croatia and overlapping PRUDENCE regions (u postupku recenzije u International Journal of Climatology)

Holtzlag AAM, EIF de Bruijn, HL Pan (1990), A high resolution air mass transformation model for short-range weather forecasting. *Monthly Weather Review*, 118: 1561–1575

IPCC (2013) *Climate Change (2013): The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley(eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

Jacob D, Petersen J, Eggert B, Alias A, Christensen OB, Bouwer LM, Braun A, Colette A, Déqué M, Georgievski G, Georgopoulou E, Gobiet A, Menut L, Nikulin G, Haensler A, Hempelmann N, Jones C, Keuler K, Kovats S, Kröner N, Kotlarski S, Kriegsmann A, Martin E, van Meijgaard E, Moseley C, Pfeifer S, Preuschmann S, Radermacher C, Radtke K, Rechid D, Rounsevell M, Samuelsson P, Somot S, Soussana J-F, Teichmann C, Valentini R, Vautard R, Weber B, & Yiou P. ( 2014). EURO-CORDEX: New high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 14: 563–578

Jones CG, Sanchez E (2002) The representation of shallow cumulus convection and associated cloud fields in the Rossby Centre atmospheric model. *HIRLAM Newsletter* 41

Jenkinson AF (1955) The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological elements. *Q J R Meteorol Soc*, 81: 158–171

Kain JS, Fritsch JM (1990) A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization. *J Atmos Sci*, 47: 2784–2802

Kain JS, Fritsch JM (1993) Convective parameterizations for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme. In: Emanuel KA, Raymond DJ (ed) *The representation of cumulus convection in numerical models*. American Meteorological Society, Monograph, Boston, USA

Kain JS (2004) The Kain–Fritsch Convective Parameterization: An Update. *J Appl Meteor* 43: 170–181

Kiel JT, RJ Wolski, BP Briegleb, V Ramanathan (1987) Documentation of radiation and cloud routines in the NCAR Community Climate Model (CCM1). NCAR Tech. rep. TN-288+1A, 109 pp.

Kotlarski S, Keuler K, Christensen OB, Colette A, Déqué M, Gobiet A, Goergen K, Jacob D, Lüthi D, van Meijgaard E, Nikulin G, Schär C, Teichmann C, Vautard R, Warrach-Sagi K & Wulfmeyer V (2014) Regional climate modeling on European scales: a joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble. *Geoscientific Model Development*, 7(4): 1297–1333

Laprise R, de Elía R, Caya D, Biner S, Lucas-Picher P, Diaconescu E, Leduc M, Alexandru A, Separovic L & Canadian Network for Regional Climate Modelling and Diagnostics (2008) Challenging some tenets of Regional Climate Modelling, *Meteorology and Atmospheric Physics*, 100(1–4): 3–22

Louis JF (1979) A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere. *Bound Layer Meteorol*, 17: 187–202

MZOE (2017) Projekt programa Prijelazni instrument tehničke pomoći EU: Jačanje kapaciteta Ministarstva zaštite okoliša i energetike za prilagodbu klimatskim promjenama te priprema Nacrta Strategije prilagodbe klimatskim promjenama (Broj ugovora: TF/HR/P3-M1-O1-010), Ministarstvo zaštite okoliša i energetike (MZOE), Zagreb.

Orlić M, Z Pasarić (2013), Semi-empirical versus process-based sea-level projections for the twenty first century. *Nature Climate Change*, 3, 735-738.

Pal JS, EE Small, EAB Eltahir (2000), Simulation of regional scale water and energy budgets: Influence of a new moist physics scheme within RegCM. *Journal of Geophysical Research*, 105: 29579–29594

Prein AF, Langhans W, Fosser G, Ferrone A, Ban N, Goergen K, Keller M, Tölle M, Gutjahr O, Feser F, Brisson E, Kollet S, Schmidli J, van Lipzig NPM & Leung R (2015) A review on regional convection-permitting climate modeling: Demonstrations, prospects, and challenges. *Reviews of Geophysics*, 53(2): 323–361

Rasch PJ, Kristjánsson JE (1998) A comparison of the CCM3 model climate using diagnosed and predicted condensate parameterizations. *J Climate*, 11: 1587–1614

Ritter B, Geleyn J-F (1992) A comprehensive radiation scheme of numerical weather prediction with potential application to climate simulations. *Mon Wea Rev*, 120: 303-325

Rummukainen M (2010) State-of-the-art with regional climate models. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 1(1): 82–96

Rummukainen M (2016) Added value in regional climate modeling: Added value in regional climate modeling. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 7(1): 145–159

Sass BH, Rontu L, Savijärvi H and Räisänen P (1994) HIRLAM-2 Radiation scheme: Documentation and tests. Hirlam technical report No 16

Savijärvi H (1990) A fast radiation scheme for mesoscale model and short-range forecast models. *J Appl Met* 29: 437–447

Samuelsson P, Gollvik S, Ullerstig A (2006) The land-surface scheme of the Rossby Centre regional atmospheric climate model (RCA3). *Report in Meteorology* 122

Tiedtke M (1989) A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models. *Mon Weather Rev*, 117: 1779–1800

Vilibić I, Šepić J, Pasarić M, Orlić M (2017) The Adriatic Sea: A Long-Standing Laboratory for Sea Level Studies. *Pure Appl. Geophys*, 174: 3765–3811

van Vuuren DP, Edmonds J, Kainuma M. i sur. (2011) The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change* (2011) 109: 5–31