

# **P 3.1. Quadro climatico per il periodo di riferimento e proiezioni climatiche attese per la Sardegna**

---

**Regione Autonoma della Sardegna - Strategia Regionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (SRACC)**

---

**Fondazione Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici**

**Divisione Modelli Regionali ed impatti geo-idrologici**

---

## Sommario

<b>Introduzione .....</b>	<b>2</b>
<b>Nota metodologica .....</b>	<b>3</b>
1.1 Informazioni climatiche disponibili.....	4
1.2 Strumenti per la ricostruzione del clima passato e presente: rianalisi climatiche.....	4
1.3 Strumenti per la caratterizzazione del clima futuro: proiezioni climatiche.....	5
1.3.1 Scenari IPCC.....	5
1.3.2 Modelli climatici regionali .....	6
1.4 Informazioni climatiche adottate per il Profilo Climatico della regione Sardegna.....	7
1.5 Indicatori climatici .....	8
<b>Risultati e discussione .....</b>	<b>10</b>
2.1 Analisi del clima sul periodo di riferimento 1981-2010 .....	11
2.2 Analisi del clima futuro .....	15
2.3 Focus sulle città metropolitane di Cagliari e Sassari .....	20
<b>Conclusioni .....</b>	<b>35</b>
<b>Bibliografia .....</b>	<b>35</b>
<b>Allegato 1: Confronto tra la rianalisi ERA5@2km e la rianalisi CERRA sul periodo 1991-2020 attraverso indicatori climatici.....</b>	<b>38</b>
<b>Allegato 2: Analisi di consistenza tra VHR-PRO_IT e l'ensemble mean EURO-CORDEX attraverso indicatori climatici.....</b>	<b>40</b>
<b>Allegato 3: Piattaforma DATACLIME .....</b>	<b>42</b>
<b>Glossario.....</b>	<b>44</b>

---

## Introduzione

Il presente elaborato ha lo scopo di delineare le caratteristiche del clima attuale e di quelle attese per effetto dei cambiamenti climatici di natura antropica nella regione Sardegna. In particolare, esso mira ad:

- analizzare la variabilità climatica a livello locale che ha caratterizzato il recente passato (solitamente identificato di seguito con il nome periodo di riferimento);
- analizzare le variazioni climatiche attese in futuro per effetto dei cambiamenti climatici sulla base di diversi scenari divulgati dall'IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, <https://www.ipcc.ch/>).

Entrambi gli obiettivi sono stati perseguiti attraverso l'utilizzo di modelli climatici ad altissima risoluzione spaziale (circa 2 km) e temporale (oraria) sviluppati recentemente dalla Fondazione CMCC. In particolare, l'analisi del clima, sviluppata su due diversi periodi di riferimento 1981-2010 e 1991-2020, si è avvalsa di un prodotto disponibile sull'intero territorio nazionale sul periodo 1981-2020 (Raffa et al., 2021) ottenuto attraverso il downscaling dinamico della rianalisi<sup>1</sup> ERA5 (Hersbach et al., 2020) prodotta dall'ECMWF (*European Center Medium Weather Forecast*)<sup>2</sup>. Allo stesso modo, per la caratterizzazione del clima futuro sono stati utilizzati i dati di proiezioni climatiche (Raffa & Mercogliano 2022) utilizzando 2 diversi scenari denominati RCP (percorsi rappresentativi di concentrazione) contenuti nell'Assessment Report 5 (AR5) dell'IPCC (IPCC, 2013).

Le variazioni nel clima futuro atteso rispetto al clima sul periodo di riferimento sono riportate in termini di indicatori climatici. Gli indicatori climatici rappresentano specifiche caratteristiche (medie ed estreme) del clima; la loro analisi permette di comprendere meglio le tendenze climatiche quantificando i cambiamenti attesi in termini di variazione di frequenza, magnitudo ed intensità anomali per alcune specifiche dinamiche atmosferiche (ondate di calore, tempeste di vento, piogge intense, siccità meteorologica) e di dare indicazioni preliminari sugli impatti del cambiamento climatico sulle diverse aree geografiche e sui vari settori. Ad esempio, l'analisi degli indicatori climatici può consentire di valutare l'evoluzione delle risorse idriche, il rischio di eventi meteorologici estremi, l'andamento del livello del mare e molte altre caratteristiche climatiche che influiscono sulla vita umana e sull'ambiente. Quest'ultima caratteristica rende gli indicatori climatici uno strumento ampiamente utilizzato in letteratura come *proxy* per lo studio delle variazioni delle caratteristiche (frequenza, intensità e persistenza) di particolari impatti (EEA 2009; EEA 2018).

---

<sup>1</sup> Una rianalisi climatica fornisce una descrizione numerica del clima recente- molto più completa di quanto possa fare qualsiasi serie di dati osservativi, combinando il modello climatico con le osservazioni disponibili da diverse fonti (misure in situ e dati satellitari per esempio).

Per maggiori dettagli [https://www.youtube.com/watch?v=FAGovUGl24&ab\\_channel=CopernicusECMWF](https://www.youtube.com/watch?v=FAGovUGl24&ab_channel=CopernicusECMWF).

<sup>2</sup> Nel presente documento il periodo di riferimento riportato è quello del 1981-2010 rispetto al quale sono state anche valutate le variazioni climatiche. Sulla piattaforma Dataclime, sull'utenza dedicata al progetto SRACC, risultano disponibili anche le analisi sul periodo di riferimento 1991-2020 rispetto al quale poi, sempre in piattaforma, sono anche disponibili le variazioni.

---

L'analisi degli indicatori climatici, quindi, fornisce informazioni utili per sviluppare politiche efficaci di adattamento al cambiamento climatico. In particolare l'utilizzo di dati di proiezione climatica ad altissima risoluzione è atteso possa supportare lo studio degli impatti di eventi estremi localizzati nello spazio e nel tempo. Questo aspetto li rende particolarmente rilevanti nel contesto urbano. A tale scopo nel presente documento è anche riportato un focus sulla condizione climatica attuale ed attesa sulle due città metropolitane di Cagliari e Sassari, finalizzata ad un supporto all'analisi di dettaglio sugli eventi estremi in ambiente urbano. Infine, allo scopo di facilitare la lettura, il presente documento è arricchito da un glossario contenente i termini tecnici maggiormente adoperati nel report.

## Nota metodologica

Il cambiamento climatico di natura antropica, come riportato dall'ampia letteratura dell'IPCC<sup>3</sup>, induce variazioni complesse delle caratteristiche del clima su diverse scale spaziali e temporali. Tali variazioni riguardano, ad esempio, le caratteristiche medie del clima (valori medi annui, ciclo stagionale) e la frequenza, intensità, estensione spaziale e durata dei fenomeni meteorologici estremi<sup>4</sup>. Tali variazioni possono assumere un'entità tale da causare degli impatti negativi sui sistemi ambientali e socioeconomici, facendo insorgere quelli che vengono tipicamente definiti “**pericoli climatici**”. Pertanto, conoscere il pericolo climatico e la sua evoluzione attesa costituisce un elemento fondamentale per lo studio e la valutazione del rischio climatico, dato dal prodotto complesso dell'interazione tra **vulnerabilità** (quanto un sistema umano e naturale è suscettibile a subire impatti negativi dei cambiamenti climatici e quanto è pronto ad adattarsi alle nuove condizioni climatiche), **esposizione** (ovvero la presenza di persone, ecosistemi, servizi, infrastrutture, attività socio-economiche e culturali, che possono essere esposti agli impatti negativi dei cambiamenti climatici), ed, infine, dal **pericolo climatico** stesso.

Comprendere le caratteristiche del pericolo climatico è fondamentale per una corretta e adeguata definizione delle strategie di adattamento<sup>5</sup>. Tali caratteristiche possono essere però controintuitive e complesse, e una loro corretta quantificazione necessita di una modellazione approfondita dei sistemi impattati. Tuttavia, per analisi generali di contesto, per caratterizzare l'evoluzione spaziale e temporale dei pericoli climatici vengono solitamente utilizzati una serie di indicatori climatici che sintetizzano alcune delle caratteristiche del clima che si ritengono di particolare rilevanza sulla base della conoscenza del territorio e degli eventi atmosferici che possano aver prodotto, nel passato, importanti impatti sul territorio.

Nei successivi paragrafi vengono descritti nel dettaglio gli indicatori climatici adottati, le simulazioni climatiche utilizzate e il tipo di analisi condotta.

---

<sup>3</sup> <https://www.ipcc.ch/>

<sup>4</sup> [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/SREX-Chap3\\_FINAL-1.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/SREX-Chap3_FINAL-1.pdf)

<sup>5</sup> <https://www.ipcc.ch/report/managing-the-risks-of-extreme-events-and-disasters-to-advance-climate-change-adaptation/>

---

## 1.1 Informazioni climatiche disponibili

A seconda della scala temporale considerata, è possibile classificare le informazioni climatiche disponibili in:

*Osservazioni* - Sono fondamentali per comprendere le caratteristiche del clima osservato su un certo periodo; includono dati provenienti da una varietà di registrazioni strumentali, che vanno dalle osservazioni meteorologiche storiche alle più recenti misurazioni satellitari.

*Rianalisi climatiche* - Combinano osservazioni con modelli climatici per generare serie temporali coerenti per un ampio insieme di variabili climatiche per il clima passato e attuale; sono tra i set di dati più utilizzati nelle scienze geofisiche.

*Proiezioni climatiche* - Forniscono proiezioni dei futuri cambiamenti climatici per diversi scenari di concentrazione di gas serra e aerosol, sulla base dei risultati di diversi modelli climatici globali e regionali.

## 1.2 Strumenti per la ricostruzione del clima sul periodo di riferimento: rianalisi climatiche

Allo scopo di creare un quadro coerente delle condizioni atmosferiche su un periodo di riferimento nel recente passato e per permettere di valutare il valore assoluto di un indicatore climatico sul medesimo periodo, da utilizzare come base per analizzarne successivamente l'evoluzione tramite le proiezioni climatiche, sono spesso utilizzate le rianalisi. Esse sono stime del clima passato basate sui medesimi modelli climatici usati per effettuare le proiezioni ma integrando opportunamente le osservazioni (misure in sito, dati satellitari, etc.) disponibili.

In generale, le rianalisi climatiche restituiscono una descrizione coerente dello stato dell'atmosfera in quanto vincolate dalle osservazioni (attraverso tecniche di assimilazione del dato), e addirittura più completa di quanto possa fare un set di dati osservativi, soprattutto per quelle variabili che usualmente non sono misurate. Inoltre, esse forniscono dati su griglia regolare anche in aree laddove le osservazioni sono scarse e/o non disponibili.

Tra le più rilevanti rianalisi attualmente disponibili vi sono quelle del programma *Copernicus Climate Change Service*, rilasciate attraverso il *Climate Data Store*<sup>6</sup>. In particolare:

- ERA5<sup>7</sup> (Hersbach et al., 2020): è una rianalisi che fornisce informazioni sulle condizioni atmosferiche a scala globale a partire dal 1940 con una risoluzione spaziale orizzontale di 30 km e temporale di 1 ora.
- CERRA<sup>8</sup> (*Copernicus European Regional ReAnalysis*; Schimanke et al. 2021): si tratta di una rianalisi per l'area europea caratterizzata da una risoluzione orizzontale di 5.5 km e che attualmente copre il periodo 1984-2021.

---

<sup>6</sup> <https://cds.climate.copernicus.eu/#!/home>

<sup>7</sup> <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>

<sup>8</sup> <https://climate.copernicus.eu/copernicus-regional-reanalysis-europe-cerra>

---

### 1.3 Strumenti per la caratterizzazione del clima futuro atteso: proiezioni climatiche

Le proiezioni climatiche sono simulazioni dell'evoluzione attesa del clima terrestre nei decenni futuri (in genere fino al 2100) basate su "scenari" ipotizzati per le concentrazioni di gas serra, aerosol e altri componenti atmosferici che influenzano l'equilibrio radiativo del pianeta. Si ottengono utilizzando modelli climatici che possono coprire l'intero globo o una regione specifica, ad esempio l'Europa. Questi modelli sono denominati rispettivamente Modelli Climatici Globali (GCM) - noti anche come Modelli di Circolazione Generale - o Modelli Climatici Regionali (RCM).

I modelli climatici globali sono fonti di informazioni fondamentali per comprendere quantitativamente come il clima della Terra potrebbe cambiare nel corso del XXI secolo. Tuttavia, essi non sono in grado di fornire informazioni sufficienti per caratterizzare gli impatti alla scala locale attesi per effetto del cambiamento climatico e/o supportare i decisori nella scelta delle azioni di adattamento, in quanto caratterizzati da una risoluzione spaziale (tipicamente 50-150 km) non sufficiente. In quest'ottica, i modelli climatici regionali ad alta risoluzione possono fornire informazioni sui cambiamenti climatici su scala regionale e locale con un maggior dettaglio spaziale, che non può essere ottenuto dai modelli climatici globali. Ciò si manifesta in una migliore descrizione delle caratteristiche climatiche regionali a piccola scala e in una rappresentazione più accurata degli eventi estremi. Di conseguenza, i risultati dei modelli climatici regionali sono indispensabili per supportare gli studi sull'impatto climatico regionale e locale e le decisioni di adattamento. Tali modelli non sono indipendenti dai modelli climatici globali, poiché questi ultimi forniscono le condizioni al contorno laterali e inferiori ai modelli regionali. In questo senso, i modelli climatici regionali possono essere visti come lenti di ingrandimento dei modelli globali.

#### 1.3.1 Scenari IPCC

Gli scenari definiti nell'ambito del quinto rapporto di valutazione dell'IPCC (AR5, IPCC 2014) rappresentano possibili traiettorie di evoluzione nel tempo della concentrazione di gas serra (GHG o Green-House Gases) e sono noti come RCP (*Representative Concentration Pathways*, in italiano Percorsi Rappresentativi di Concentrazione), in quanto sono espressi in termini di concentrazioni di gas serra piuttosto che in termini di livelli di emissioni (Van Vuuren et al. 2011). Il numero associato a ciascun RCP indica il Forzante Radiativo (in  $W/m^2$ ), ovvero l'aumento di flusso radiativo (una misura indiretta dell'intensità delle attività antropiche) nella parte più esterna dell'atmosfera raggiunto alla fine del secolo rispetto all'epoca preindustriale. Gli scenari di concentrazione sono definiti "percorsi rappresentativi" poiché rappresentano una narrativa delle politiche di mitigazione attuate nel prossimo futuro: a politiche di mitigazione ambiziose corrisponderà un minore aumento nella concentrazione di gas serra, e viceversa.

Gli scenari IPCC utilizzati nella presente analisi sono i seguenti:

- **RCP4.5** ("forte stabilizzazione", con riduzioni consistenti delle emissioni). Questo scenario assume che si intraprendano iniziative mirate per controllare il livello di emissioni di gas serra, grazie alle quali entro il 2070 le emissioni di  $CO_2$  si presume scenderanno al di sotto dei livelli attuali (400 ppm), mentre la concentrazione atmosferica è prevista stabilizzarsi entro la fine del secolo a circa il doppio dei livelli preindustriali.

- 
- **RCP8.5** (“Ad elevate emissioni”) - crescita delle emissioni ai ritmi attuali. Tale scenario ipotizza misure di mitigazione irrilevanti, che porteranno, entro il 2100, a concentrazioni atmosferiche di CO<sub>2</sub> triplicate o quadruplicate (840-1120 ppm) rispetto ai livelli preindustriali (280 ppm).

Per quanto attiene l’utilizzo dello scenario RCP8.5 è importante menzionare che esso è oggetto di critica in quanto ritenuto troppo pessimistico e poco realistico nei suoi presupposti tecnologici ed economici (Hausfather & Peters 2020). L’utilizzo di questo scenario si rende utile quando si vuole rispondere alla domanda su quale sia la cosa peggiore possa accadere, ovvero segnalare potenziali rischi che emergono solamente agli estremi.

È utile segnalare che il sesto rapporto dell’IPCC (AR6, IPCC 2021) ha introdotto nuovi scenari, che integrano le traiettorie di concentrazione già definite (gli RCP) con una selezione di possibili “Percorsi Socioeconomici Condivisi” (*Shared Socio-economic Paths, SPP*), cinque diverse “narrazioni” che corrispondono ad altrettanti possibili futuri socioeconomici. Gli scenari così definiti coprono alternative che vanno da “emissioni molto basse” (SSP1 – 1.9) a “emissioni molto alte” (SSP5 – 8.5), passando, tra i vari scenari, per “emissioni basse” (SSP1 – 2.6), “intermedie” (SSP2 – 4.5) e “alte” (SSP3 – 7.0). Un’analisi a livello italiano dell’evoluzione climatica utilizzando tali scenari è presente nel report “G20 Climate risk Atlas – Impacts, policy, economics<sup>9</sup>”. Tuttavia tale analisi si basa sull’utilizzo di modelli climatici globali i quali sono caratterizzati attualmente da una risoluzione spazio-temporale che li rende inadeguati ad analisi su un territorio così limitato come quello della regione Sardegna.

### 1.3.2 Modelli climatici regionali

Come già detto in precedenza, i modelli climatici globali attualmente disponibili non sono sufficientemente precisi per valutare l’andamento dei parametri climatici su una scala così ristretta come quella del territorio oggetto di studio nel presente documento. Tuttavia, questi modelli sono essenziali per rappresentare le dinamiche atmosferiche globali con una risoluzione orizzontale compresa tra 50 e 150 km.

Allo scopo di studiare il pericolo climatico su tali aree limitate sono disponibili modelli climatici regionali, con risoluzioni dell’ordine dei 10-15 km, che permettono una caratterizzazione molto più spinta dei processi. I modelli climatici regionali consentono di aumentare la risoluzione spazio-temporale dei modelli di circolazione globale e di formulare scenari di cambiamento climatico più adeguati ad analisi di impatto su scala locale. Di particolare rilevanza a livello europeo sono Modelli Climatici Regionali prodotti dalla comunità scientifica internazionale nell’ambito del programma EURO-CORDEX<sup>10</sup> con una risoluzione di circa 12 km sull’Europa (Jacob et al. 2014). Tra i diversi modelli disponibili nel programma EURO-CORDEX alla risoluzione di circa 12 km. È importante sottolineare che le analisi prodotte dai modelli climatici sono affette, per diversi motivi, da incertezze, quali ad esempio i differenti scenari di concentrazione ipotizzati, l’imperfetta

---

<sup>9</sup> <https://files.cmcc.it/g20climaterisks/Italy.pdf>

<sup>10</sup> <https://www.euro-cordex.net/>

---

simulazione, da parte dei modelli, del sistema climatico, e la sua elevata complessità e non-linearità (Collins 2006). Per tale motivo, specie per il supporto alle decisioni, si preferisce la strategia di utilizzare, oltre all'utilizzo di diversi scenari, anche un ensemble di catene modellistiche diverse che permette appunto di quantificare alcune fonti di incertezza (Von Trentini et al. 2019).

#### 1.4 Dati climatici adottati per l'elaborazione del Profilo Climatico della regione Sardegna

L'area italiana rappresenta una sfida per gli attuali modelli climatici in virtù della complessità e variabilità del suo clima dovuta principalmente alla sua estensione territoriale, alla complessità orografica e all'influenza del Mar Mediterraneo. Tali peculiarità contribuiscono ad aumentare le incertezze associate alle simulazioni del clima corrente e delle proiezioni, specialmente in relazione alla riproduzione degli eventi estremi.

I modelli climatici di nuova generazione, denominati *Convection Permitting Model* (CPM), permettono di aumentare la risoluzione spaziale (1-3 km) e temporale (oraria), migliorando la caratterizzazione dei fenomeni atmosferici localizzati. Nello specifico, essi consentono di risolvere in modo esplicito i fenomeni convettivi, restituendo quindi una migliore rappresentazione degli eventi di precipitazione intense e localizzate sia nel tempo che nello spazio. Tale valore aggiunto è stato dimostrato nel corso di diverse iniziative internazionali (es. CORDEX Flagship Pilot Study on Convection<sup>11</sup>), progetti Europei (es. H2020 European Climate Prediction systems<sup>12</sup>) e pubblicazioni scientifiche (Lucas-Picher et al. 2021, Kendon et al. 2021). I modelli climatici CPM, sebbene permettano, grazie ad una maggior risoluzione spaziale, una valutazione più accurata degli elementi di orografia complessa (linea di costa e catene montuose), non sono comunque in grado di rappresentare la continuità reale di tali elementi geografici. Possono, dunque, risultare sulla costa o in aree montuose, elementi geografici non descritti con la complessità reale; tuttavia ciò non impedisce una valutazione climatica, alla risoluzione effettiva del modello, dell'area investigata.

Proprio in quest'ottica, negli ultimi anni la Fondazione CMCC ha deciso di adoperare il modello climatico regionale COSMO-CLM (Rockel et al. 2008) in modalità *convection-permitting*, in associazione con una parametrizzazione specifica per le città, al fine di produrre dati climatici sul clima corrente e futuro (Adinolfi et al. 2021, Raffa et al. 2021, Reder et al. 2022). In particolare, la Fondazione CMCC ha recentemente sviluppato e rilasciato due specifici prodotti rispettivamente per la caratterizzazione del clima passato e presente e la caratterizzazione del clima futuro. Nello specifico:

- ERA5@2km (chiamata anche VHR-REA\_IT, ovvero *Very High-Resolution REAnalysis for Italy*; Raffa et al. 2021): è una simulazione per il clima recente sull'intero territorio italiano ottenuta attraverso la localizzazione dinamica della rianalisi globale ERA5 alla risoluzione di circa 2 km per il periodo 1981-2020 con risoluzione oraria.

---

<sup>11</sup> <https://www.norceresearch.no/en/projects/cordex-flagship-pilot-study-on-convective-phenomena-at-high-resolution-over-europe-and-the-mediterranean-fpsconv>

<sup>12</sup> <https://www.eucp-project.eu/>



- 
- VHR-PRO\_IT (Raffa et al. 2023): è una simulazione per il clima futuro per gli scenari IPCC RCP4.5 e RCP8.5 sull'intero territorio italiano ottenuta attraverso la localizzazione dinamica di Italy8km-CM (Bucchignani et al. 2015) alla risoluzione di circa 2 km per il periodo 1981-2070 (1981-2005 per l'esperimento denominato *historical*; 2006-2070 per gli esperimenti guidati dalle ipotesi di scenario IPCC RCP4.5 e RCP8.5).

Nel presente elaborato, il profilo climatico della regione Sardegna è stato realizzato adottando questi due prodotti. In particolare, le caratteristiche del clima passato e corrente sono state analizzate sul periodo 1981-2010, mentre le caratteristiche del clima futuro sono state delineate valutando le potenziali variazioni attese sotto gli scenari RCP4.5 e RCP8.5 per il periodo 2021-2050 rispetto ad un periodo di riferimento 1981-2010. La valutazione delle variazioni climatiche (anomalie) sui due trentenni stabiliti non richiede l'applicazione di tecniche di bias correction che risultano essere, sulla base della letteratura, invece una pratica indispensabile per poter adoperare i dati prodotti dai modelli simulati (sia sul periodo storico che di scenario) in termini assoluti; ad esempio come input di modelli di processo che utilizzano i dati in termini assoluti e non di variazione (anomalia).

Per entrambe le elaborazioni, sono stati effettuati confronti con prodotti disponibili e rappresentativi dello stato dell'arte. In particolare, i risultati restituiti da ERA5@2km sono stati confrontati (vedi Allegato 1: Confronto tra la rianalisi ERA5@2km e la rianalisi CERRA sul periodo 1991-2020 attraverso indicatori climatici) con quelli ottenuti attraverso la rianalisi CERRA, la quale condivide con ERA5@2km lo stesso modello "genitore" (ovvero ERA5) ed una risoluzione spaziale paragonabile (circa 5.5 km). Tale confronto è stato effettuato sul periodo comune 1991-2020. Allo stesso modo, la consistenza dei risultati restituiti sul clima futuro è stata confrontata con il sotto-insieme di modelli Euro-CORDEX (risoluzione spaziale di circa 12 km) disponibili nella piattaforma Copernicus13, in particolare con la variabilità tra i modelli stessi. In questo caso la scala spaziale è poco paragonabile. Tuttavia, l'elevato attuale costo computazionale delle simulazioni CPM, ampiamente documentato in letteratura (es. Prein et al. 2015), rende difficile la costruzione di un ensemble di simulazioni con risoluzione spaziale di circa 2 km su una durata temporale maggiore ai 10 anni<sup>14</sup>. Al fine di utilizzare un singolo modello (più risoluto) è stata effettuata una valutazione di consistenza tra il dataset VHR-PRO\_IT e l'ensemble mean EURO-CORDEX attraverso indicatori climatici (come riportato in allegato 2). In questo caso si evince che i risultati del dataset VHR\_PRO\_IT sono coerenti con l'ensemble EURO-CORDEX e tendono ad estremizzare le variazioni per la precipitazione.

### 1.5 Indicatori climatici

Gli indicatori climatici sono comunemente utilizzati nella letteratura di settore per caratterizzare il clima del recente passato e/o quello atteso, sia per quanto riguarda il clima medio, sia per l'analisi

---

<sup>13</sup> <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/projections-cordex-single-levels?tab=form>

<sup>14</sup> Un esempio di ensemble di simulazioni CPM è stato prodotto nell'ambito del progetto EUCP <https://cordis.europa.eu/project/id/776613/it>

degli eventi estremi. La maggior parte degli indicatori utilizzati, come quelli definiti dall'ETCCDI<sup>15</sup> (*Expert Team on Climate Change Detection and Indices*; Karl et al. 1999, Peterson et al. 2001) sono ricavati a partire dalle variabili di precipitazione e temperatura, e risultano utili per studi di settore volti a valutare i principali impatti locali del cambiamento climatico su cui basare, ad esempio, strategie di adattamento al cambiamento climatico. È importante rilevare che l'analisi degli indicatori climatici non può essere ritenuta esaustiva; tuttavia, essi restano un metodo speditivo che può essere impiegato in via preliminare rispetto all'applicazione di più complessi modelli di impatto fisicamente basati (EEA 2009, EEA 2018).

Nella **Tabella 1** sono riportati gli indicatori analizzati nel presente lavoro. Essi sono stati identificati tra quelli disponibili in letteratura sulla base delle esigenze locali e per le finalità della strategia ovvero per la valutazione specifica dell'evoluzione della pericolosità climatiche per effetto del cambiamento climatico nei seguenti ambiti: salute ed energia, stato e disponibilità della risorsa idrica, dissesto geo-idrologico e idraulico.

*Tabella 1: Lista degli indicatori\* adottati per la mappatura degli indicatori climatici per il target "Territorio"*

Indicatore (unità di misura)	Descrizione	Pericolo climatico rappresentato	Settore
TG – Temperatura media giornaliera (°C)	Media della temperatura giornaliera	Aumento delle temperature	Generale
TX95PRCTILE- 95° percentile della temperatura massima (°C)	95° percentile della temperatura massima giornaliera	Variabilità delle temperature	Generale
TX99PRCTILE- 99° percentile della temperatura massima (°C)	99° percentile della temperatura massima giornaliera		
TXX-Massimo della temperatura massima (°C)	Valore massimo della temperatura massima giornaliera.		
TN99PRCTILE-99° percentile della temperatura minima (°C)	99° percentile della temperatura minima giornaliera		
TNX-Massimo della temperatura minima (°C)	Valore massimo della temperatura minima giornaliera.		
PRCPTOT – Precipitazione cumulata nei giorni piovosi (mm)	Somma della precipitazione giornaliera per i giorni con precipitazione giornaliera maggiore o uguale a 1 mm	Dissesto geo-idrologico	Vari settori in quanto il dissesto geo-idrologico costituisce un pericolo che interessa la maggior parte dei settori,
R20 – Giorni con precipitazione intensa (giorni)	Numero di giorni in cui la precipitazione giornaliera supera i 20 mm		
RX1DAY – Massimo di precipitazione giornaliera (mm)	Valore massimo di precipitazione giornaliera per i giorni con precipitazione giornaliera maggiore o uguale a 1 mm		
RX5DAY-Massima precipitazione in 5-giorni (mm/giorni)	Massima precipitazione in 5-giorni.		

<sup>15</sup> [http://etccdi.pacificclimate.org/list\\_27\\_indices.shtml](http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml)

PR95prctile – 95° percentile di precipitazione giornaliera (mm)	Valore di precipitazione giornaliera associato ad un livello di probabilità di non superamento del 95%, estratto dal campione di valori di precipitazione giornaliera maggiori o uguali a 1 mm		ognuno con diverso grado di esposizione
PR99prctile – 99° percentile di precipitazione giornaliera (mm)	Valore di precipitazione giornaliera associato ad un livello di probabilità di non superamento del 99%, estratto dal campione di valori di precipitazione giornaliera maggiori o uguali a 1 mm		
R99PTOT -Frazione di precipitazione nei giorni estremamente piovosi (%)	Frazione di precipitazione dovuta alla precipitazione maggiore del 99° percentile della precipitazione giornaliera.		
TR100PR - Tempo di ritorno a 100 anni (precipitazione) (mm)	Percentile corrispondente ad un tempo di ritorno di cento anni per il massimo annuale di precipitazione giornaliera.		
CDD – Giorni secchi consecutivi (giorni)	Numero massimo di giorni consecutivi con precipitazione giornaliera minore di 1 mm	Siccità	Produzioni agricole, Risorse Idriche ed Ecosistemi terrestri
ID – Giorni senza disgelo (giorni)	Numero di giorni in cui la temperatura massima giornaliera è inferiore a 0° C	Ondate di freddo	Salute, Energia
WSDI – Indice di durata dei periodi di caldo (giorni)	Numero di giorni in cui la temperatura massima giornaliera è superiore al 90° percentile della temperatura massima giornaliera per almeno 6 giorni consecutivi	Ondate di caldo	Salute, Energia
HW-Ondate di caldo (giorni)	Numero di giorni con temperatura massima giornaliera maggiore di 35°C.		
HWN- Numero ondate di calore	Numero di ondate di calore. L'ondata di calore è individuata dal superamento, per almeno 3 giorni consecutivi del 90° percentile delle temperature massime valutato su una finestra mobile di 31 giorni nel trentennio di riferimento.		
TR – Notti tropicali (giorni)	Numero di giorni con temperatura minima giornaliera superiore a 20°C	Disagio termico	Salute

\*La lista con il dettaglio dei pericoli e dei settori di interesse è quella riportata nella bozza corrente del Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (PNACC versione 2022, in bozza)

\*\*A partire da SPI, la variabile di cui è calcolata la variazione climatica è il numero di eventi di siccità per diversi gradi di severità. L'evento di siccità ha inizio, in generale, quando SPI scende sotto una soglia limite, e ha fine quando risale sopra la soglia. L'indicatore rappresenta la percentuale di eventi, sul totale degli eventi di siccità nel trentennio, classificati come "molto asciutti [*severe dry*]" e "estremamente asciutti [*extreme dry*]" a seconda dei valori raggiunti da SPI durante l'evento.

## Risultati e discussione

Questa Sezione descrive i risultati dell'analisi del clima sul periodo di riferimento (tramite re-analisi e osservazioni) e attese per il clima futuro (tramite proiezioni climatiche eseguite da modelli climatici ad altissima risoluzione) sviluppati sulla regione Sardegna. Nello specifico, gli indicatori di **Tabella 1** sono stati calcolati avvalendosi dei modelli sviluppati dalla Fondazione CMCC e riportati di seguito sia in forma tabellare sia attraverso opportune mappe per mostrarne la variazione spaziale. Il presente documento presenta una selezione significativa dei risultati ottenuti. Si rimanda all'utenza dedicata sulla piattaforma DATACLIME ([www.dataclime](http://www.dataclime)) per poter visualizzare e

scaricare tutte le analisi prodotte. Maggiori informazioni sulle modalità di accesso alla piattaforma DATACLIME sono descritte all' **Allegato 3: Piattaforma DATACLIME**.

## 2.1 Analisi del clima sul periodo di riferimento 1981-2010

Le caratteristiche del clima passato e presente sono state analizzate calcolando gli indicatori di **Tabella 1** per le serie di dati restituite dalla rianalisi ERA5@2km sul periodo 1981-2020. Ciascun indicatore è stato analizzato in primo luogo come media spaziale sulla regione con riferimento al trentennio caratterizzato, fornendo anche un'informazione sulla variabilità spaziale dell'indicatore stesso attraverso la sua deviazione standard. Tali risultati sono riportati in **Tabella 2**.

*Tabella 2: Medie spaziali degli indicatori calcolati sulla regione Sardegna a partire dalla rianalisi ERA5-2km per il periodo 1981-2010; nelle colonne +/-SD viene invece riportata una stima della variabilità spaziale su scala regionale (tramite il calcolo della deviazione standard)*

Indicatore	Valore medio spaziale	+/- SD
TG (°C)	15.8	1.6
TX95PRCTILE (°C)	34.4	2.2
TX99PRCTILE (°C)	38.0	2.1
TXX (°C)	40.2	2.1
TN99PRCTILE (°C)	24.5	0.9
TNX (°C)	25.8	0.9
PRCPTOT (mm)	456	122
R20 (giorni)	5	2
RX1DAY (mm/giorni)	51	14
RX5DAY (mm/giorni)	78	22
PR95PRCTILE (mm)	26	4
PR99PRCTILE (mm)	49	12
R99PTOT (%)	8	1
TR100PR (mm)	132	56
CDD (giorni)	64	13
ID (giorni)	1	2*
WSDI (giorni)	4	1
HW (giorni)	18	13
HWN (occorrenza)	3	1
TR (giorni)	46	16

\* Tale indicatore è al minimo pari a zero

Per un sotto-insieme di questi indicatori sono mostrate nelle Figure successive (**Figura 1**, **Figura** , **Figura** , **Figura 5**, **Figura 6** e **Figura 7**) le relative mappe dei valori medi ottenuti (o di distribuzioni) ancora una volta sul trentennio 1981-2010.

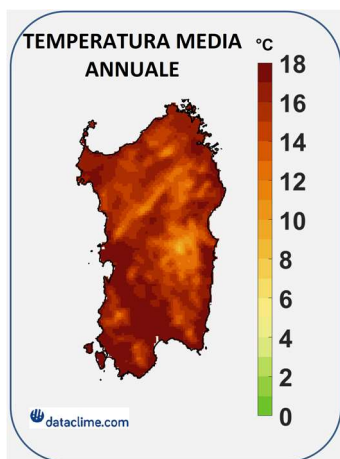


Figura 1: Temperatura media annuale, TG. Elaborazione rianalisi ERA5@2KM sul periodo 1981-2010

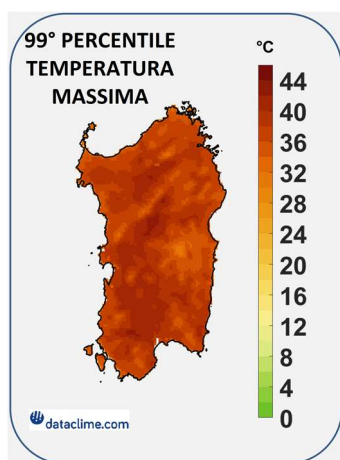


Figura 2: 99° percentile della temperatura massima, TX99PRCTILE. Elaborazione rianalisi ERA5@2KM sul periodo 1981-2010

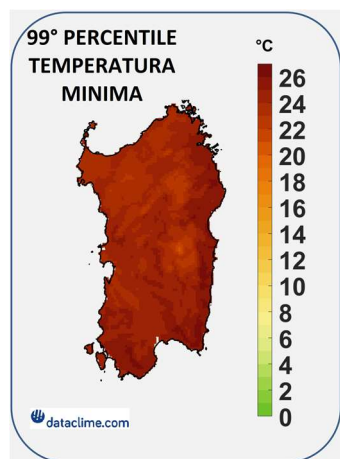


Figura 3: 99° percentile della temperatura minima, TN99PRCTILE. Elaborazione rianalisi ERA5@2KM sul periodo 1981-2010

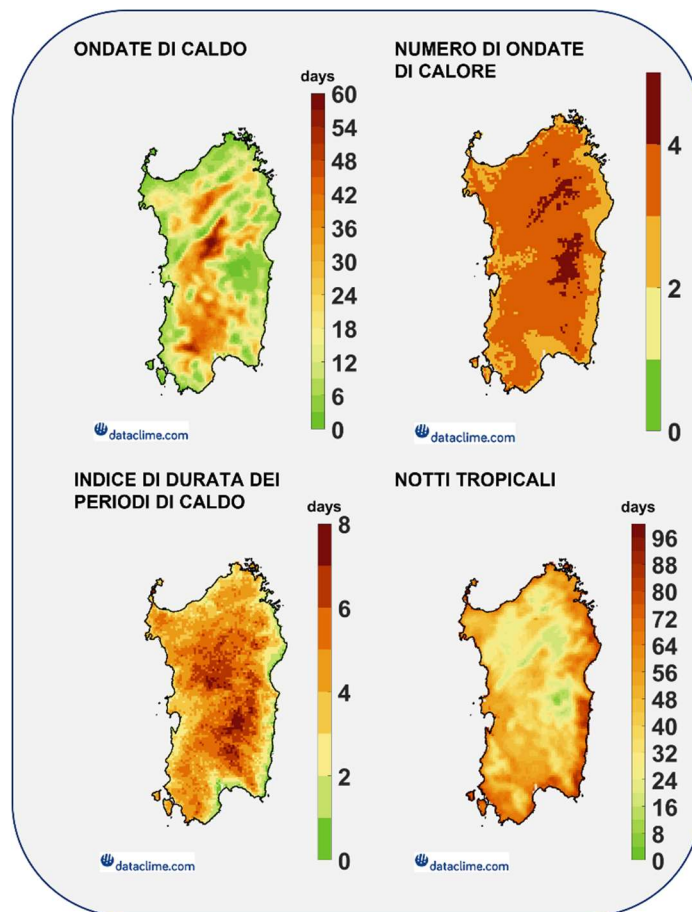


Figura 4: (sulla linea superiore, da sinistra verso destra) ondate di caldo, HW; numero di ondate di calore, HWN; (sulla seconda linea, da sinistra verso destra) indice di durata dei periodi di caldo, WSDI; numero di notti tropicali, TR. Elaborazione rianalisi ERA5@2km sul periodo 1981-2010.

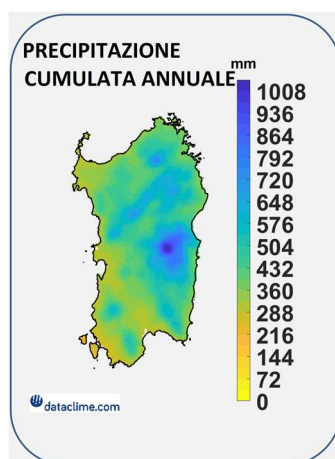


Figura 5: Precipitazione cumulata annuale, PRCPTOT. Elaborazione rianalisi ERA5@2KM sul periodo 1981-2010

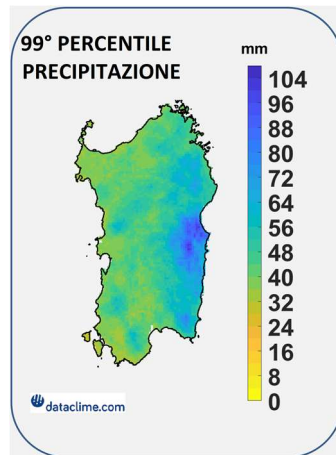


Figura 6: 99° percentile della precipitazione, PR99PRCTILE. Elaborazione rianalisi ERA5@2KM sul periodo 1981-2010

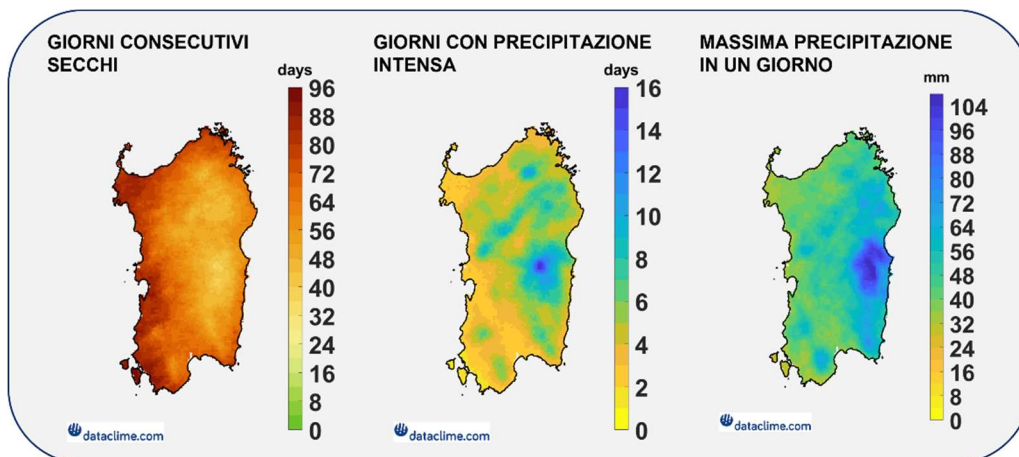


Figura 7: (a sinistra) giorni consecutivi secchi, CDD; (al centro) giorni con precipitazione intensa, R20; (a destra) massima precipitazione in 1-giorno, RX1DAY. Elaborazione rianalisi ERA5@2km sul periodo 1981-2010.

Il valore medio della temperatura media annuale (TG) nella regione Sardegna è di circa 16°C con una variabilità su scala regionale di circa 2°C. Dal punto di vista spaziale (mappa in **Figura 1**) si evidenzia che le temperature medie annuali risultano essere più basse (tra 8 e 14° C) sul territorio montuoso (costituito dai Monti Limbara a nord, dal massiccio dei Monti del Gennargentu nella zona centro orientale e dai Monti di Alà, del Goceano, del Marghine ad occidente). Per quanto riguarda altri indicatori legati alla temperatura, la Sardegna è caratterizzata da un numero di giorni all'anno con temperatura massima giornaliera maggiore di 35 °C (HW) di circa 18 giorni in media su tutta l'area, con valori massimi compresi tra 30 e 60 giorni nell'area interna pianeggiante (**Figura 4**, indicatore ondate di caldo). Al contrario, le aree montuose sono caratterizzate dai periodi di caldo più lunghi (WSDI) con valori di circa quattro giorni consecutivi per anno (**Figura 4**, indicatore di durata dei periodi di caldo). Anche il numero di ondate di calore (HWN) risulta essere maggiore sulle catene montuose a nord-est della Sardegna e sul massiccio dei Monti del Gennargentu (**Figura 4**, indicatore numero di ondate di calore). Infine, la Sardegna è caratterizzata da un numero annuale

medio di notti tropicali (TR) elevato (circa 46 giorni) con valori massimi in particolare sulla costa orientale della regione (**Figura 4**, indicatore notti tropicali).

Focalizzandosi sulle caratteristiche delle precipitazioni, il valore medio di precipitazione cumulata annuale (PRCPTOT) sulla Sardegna è di circa 456 mm con una variabilità su scala regionale di circa 122 mm. Dal punto di vista spaziale (mappa in **Figura 5**), i valori maggiori sono riscontrabili nelle aree montuose con valori che possono raggiungere circa 1000 mm all'anno su Punta La Marmora, la vetta più alta del massiccio dei Monti del Gennargentu. Di contro, l'area pianeggiante sud-occidentale della regione mostra precipitazioni piuttosto scarse. Per quanto riguarda altri indicatori legati alla precipitazione e ai suoi estremi, i giorni di precipitazione intensa (R20) sono circa 5 all'anno mediamente su tutta la regione con valori che superano i 10 giorni/anno nelle aree montuose della regione Sardegna, individuate come le più piovose (**Figura 7**, indicatore giorni con precipitazione intensa). La stessa dipendenza orografica si osserva per gli indicatori 99° percentile della precipitazione (PR99PRCTILE) e massima precipitazione in 1-giorno (RX1DAY) con valori medi rispettivamente di circa 49 mm e circa 51 mm su tutta la regione e valori maggiori fino ad oltre 90 mm che si localizzano sulle aree montuose (**Figura 6; Figura 7**, indicatore massima precipitazione in 1-giorno). Infine, in Sardegna la durata di giorni consecutivi senza precipitazione (CDD) è al più di 64 giorni (circa 2 mesi) con valori che tendono ad aumentare sulla zona occidentale fino ad arrivare a oltre 80-85 giorni (circa 3 mesi) (**Figura 7**, indicatore giorni consecutivi secchi).

## 2.2 Analisi del clima futuro atteso

Le caratteristiche del clima atteso sul periodo futuro sono state analizzate in termini di variazioni annuali degli indicatori di **Tabella 1** calcolate per il trentennio 2021-2050 rispetto al trentennio di riferimento 1981-2010. In questo caso, ci si è avvalsi dei dati restituiti dalla proiezione climatica VHR-PRO\_IT nelle ipotesi di scenario RCP4.5 e RCP8.5. I risultati dell'analisi sono riportati in **Tabella 3** in termini di variazione media spaziale sulla regione e variabilità spaziale (in termini di deviazione standard).

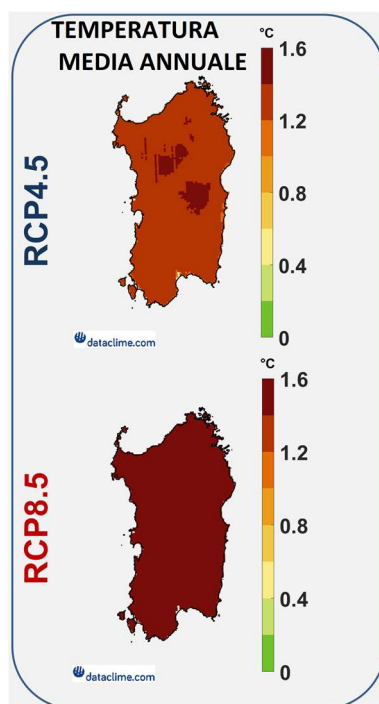
*Tabella 3: Variazioni delle medie spaziali annuali degli indicatori calcolati sulla regione Sardegna; nelle colonne +/-SD viene invece riportata una stima della variabilità spaziale su scala regionale (tramite il calcolo della deviazione standard). Le variazioni sono calcolate per il periodo 2021-2050 rispetto al 1981-2010 sotto gli scenari IPCC RCP4.5 e RCP8.5*

Indicatore	RCP4.5		RCP8.5	
	Valore medio spaziale	+/- SD	Valore medio spaziale	+/- SD
TG (°C)	1.3	0.1	1.5	0.0
TX95PRCTILE (°C)	1.5	0.1	1.5	0.1
TX99PRCTILE (°C)	1.4	0.2	1.5	0.2
TXX (°C)	1.2	0.3	1.5	0.4
TN99PRCTILE (°C)	1.6	0.2	1.5	0.2
TNX (°C)	1.5	0.3	1.4	0.2
PRCPTOT (%)	1	6	2	3
R20 (giorni)	0	1	1	1
RX1DAY (%)	23	15	17	11



RX5DAY (%)	16	13	14	10
PR95PRCTILE (%)	15	9	16	6
PR99PRCTILE (%)	26	17	20	11
R99PTOT (%)	5	3	4	2
TR100PR (%)	33	33	22	28
CDD (giorni)	1	4	4	4
ID (giorni)	-1	1	-1	2
WSDI (giorni)	14	4	11	3
HW (giorni)	7	4	7	3
HWN (%)	105	21	105	25
TR (giorni)	17	4	17	5

Per un sotto-insieme di questi indicatori sono mostrate nelle Figure successive (**Figura 8**, **Figura9**, **Figura 10**, **Figura 11**, **Figura 12** e **Figura 13**) le relative mappe delle variazioni attese nel trentennio 2021-2050 rispetto al periodo di riferimento 1981-2010.



**Figura 8:** Variazione della temperatura media annuale, TG. Elaborazione proiezione climatica VHR-PRO\_IT sotto gli scenari RCP4.5 e RCP8.5 sul periodo 2021-2050 rispetto al riferimento 1981-2010.

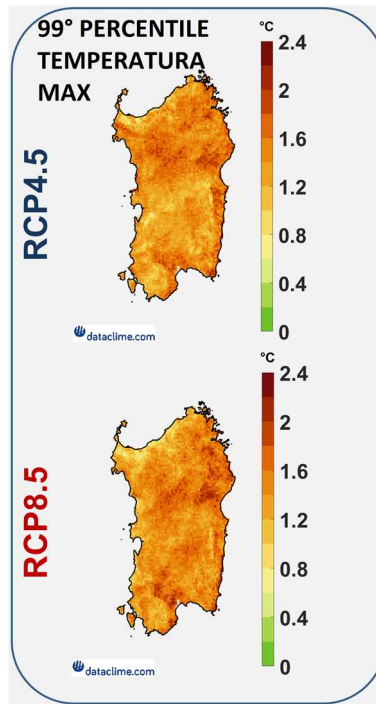


Figura 9: Variazione del 99° percentile della temperatura massima, TX99PRCTILE. Elaborazione proiezione climatica VHR-PRO\_IT sotto gli scenari RCP4.5 e RCP8.5 sul periodo 2021-2050 rispetto al riferimento 1981-2010

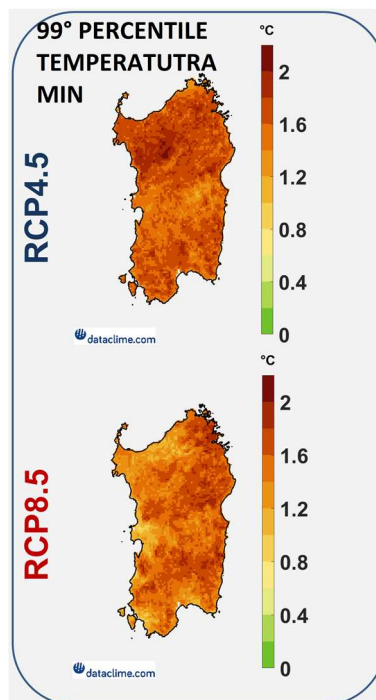


Figura 10: Variazione del 99° percentile della temperatura minima, TN99PRCTILE. Elaborazione proiezione climatica VHR-PRO\_IT sotto gli scenari RCP4.5 e RCP8.5 sul periodo 2021-2050 rispetto al riferimento 1981-2010

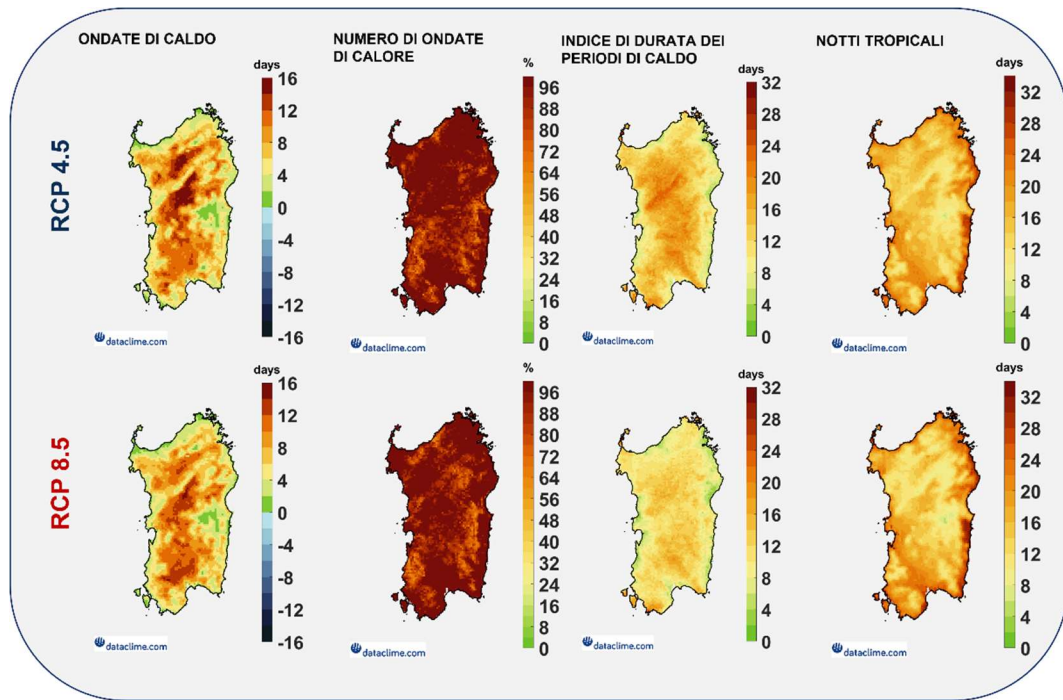


Figura 11: (da sinistra verso destra) Variazione del numero di ondate di caldo, HW; Variazione del numero di ondate di calore, HWN; Variazione dell'indice di durata dei periodi di caldo, WSDI; Variazione del numero di notti tropicali, TR. Elaborazione proiezione climatica VHR-PRO\_IT sotto gli scenari RCP4.5 e RCP8.5 sul periodo 2021-2050 rispetto al riferimento 1981-2010.

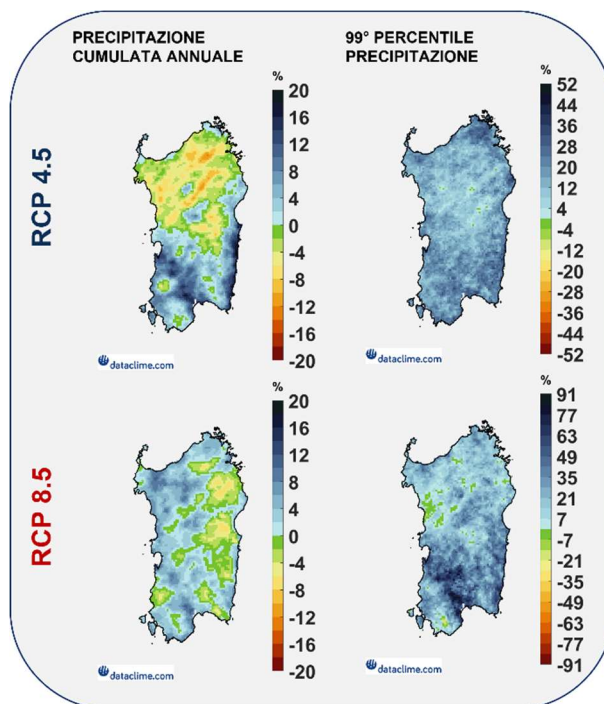
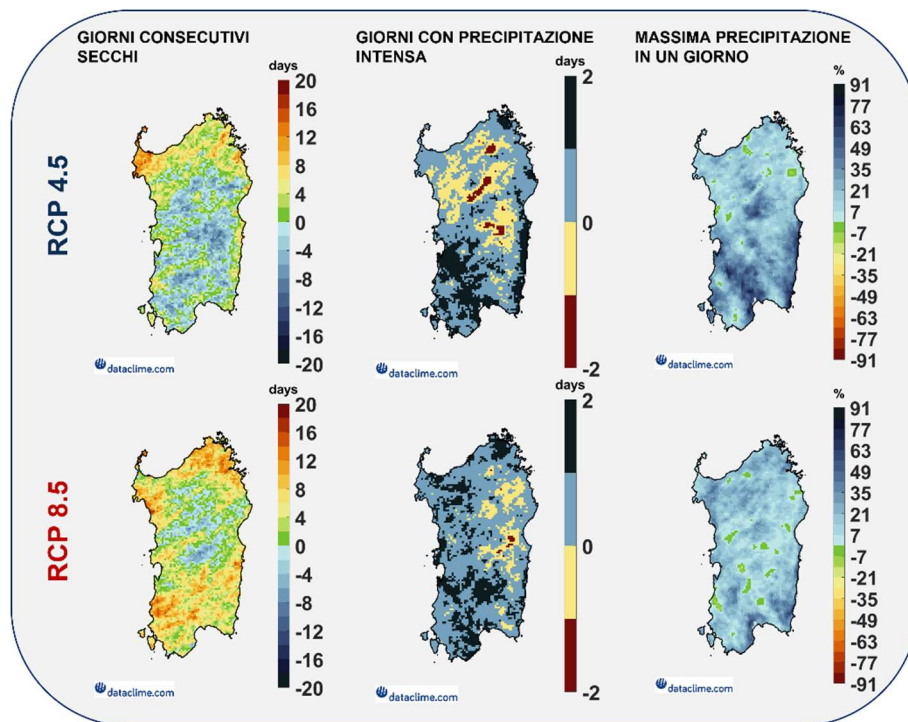


Figura 12: (a sinistra) Variazione della precipitazione cumulata annuale, PRCPTOT; (a destra) Variazione del 99° percentile della precipitazione, PR99prctile. Elaborazione proiezione climatica VHR-PRO\_IT sotto gli scenari RCP4.5 e RCP8.5 sul periodo 2021-2050 rispetto al riferimento 1981-2010.



*Figure 13: (a sinistra) Variazione del numero massimo di giorni consecutivi secchi, CDD; (al centro) Variazione del numero giorni con precipitazione intensa, R20; (a destra) Variazione della massima precipitazione in 1-giorno, RX1DAY. Elaborazione proiezione climatica VHR-PRO\_IT sotto gli scenari RCP4.5 e RCP8.5 sul periodo 2021-2050 rispetto al riferimento 1981-2010.*

In generale, è atteso un aumento degli indicatori di temperatura media e degli estremi su tutta l'area di studio con una magnitudo strettamente collegata alle ipotesi di scenario considerate. In particolare, gli aumenti sono più marcati nell'ipotesi di scenario RCP8.5 rispetto allo scenario RCP4.5. In dettaglio, è atteso un aumento uniforme dal punto di vista spaziale della temperatura media (TG) di 1.3 °C e 1.5 °C per gli scenari RCP4.5 e RCP8.5 rispettivamente. Tendenze analoghe sono attese per gli estremi di temperatura massima e di temperatura minima (TX99PRCTILE e TN99PRCTILE) con incrementi medi rispettivamente di 1.4 °C e 1.6 °C per lo scenario RCP4.5 e 1.5°C e 1.5°C per lo scenario RCP8.5. Per questi indicatori, la variabilità spaziale è praticamente la stessa (deviazione standard =  $\pm 0.2$  °C). Per quanto riguarda le variazioni in numeri di giorni/occorrenze di indicatori legati alla temperatura massima e alla temperatura minima, è atteso un aumento del numero di ondate di caldo (HW) di 7 giorni per lo scenario RCP4.5 e 86 giorni per lo scenario RCP4.5; allo stesso modo, è proiettato un aumento percentuale del numero di eventi di ondate di calore (HWN) del 105% per lo scenario RCP4.5 e del 106% per lo scenario RCP8.5, con una significativa variabilità spaziale (deviazione standard di  $\pm 22\%$  nel primo caso e  $\pm 27\%$  nel secondo caso). Anche l'indice di durata dei periodi di caldo (WSDI) è atteso aumentare nel 2021-2050 rispetto al 1981-2100 di 13 giorni per lo scenario RCP4.5 e 11 giorni per lo scenario RCP8.5. Infine, è proiettato un aumento del numero di notti tropicali (TR) di circa 17 giorni per entrambi gli scenari con maggiori variazioni lungo la costa orientale dell'isola.

Per quanto riguarda la precipitazione, le proiezioni sotto le due ipotesi di scenario considerate indicano un leggero incremento della precipitazione cumulata sull'anno (PRCPTOT) con una variabilità spaziale desunta dalla deviazione standard del 6% sotto lo scenario RCP4.5 e del 3% sotto

lo scenario RCP8.5. Dal punto di vista spaziale, inoltre, si nota una riduzione a nord della Sardegna e un aumento al sud. L'analisi degli estremi di precipitazione restituisce un generale incremento dei massimi di pioggia in 1-giorno (RX1DAY) e degli indicatori espressi in termini di percentili (ad esempio PR99PRCTILE). Per entrambi gli indicatori, tali incrementi sono maggiori sotto lo scenario RCP4.5 (23% e 26% rispettivamente) rispetto allo scenario RCP8.5 (17% e 20% rispettivamente) con anche una maggiore variabilità spaziale. Ciononostante, solo in alcune aree della Sardegna è atteso un lieve aumento, di al più 2 giorni, del numero di giorni con precipitazione intensa (R20). Infine, in accordo con la definizione di scenario RCP4.5, è atteso un aumento del massimo numero di giorni consecutivi con assenza di precipitazioni (CDD) sulla parte settentrionale dell'area di studio, mentre in gran parte del centro e del sud della Sardegna è attesa una riduzione di tali valori. Al contrario, le proiezioni mostrano un aumento di CDD nel caso dello scenario RCP8.5 su gran parte della regione.

### 2.3 Focus sulle città metropolitane di Cagliari e Sassari

In analogia con quanto riportato a livello regionale, questa Sezione propone un approfondimento per le città metropolitane di Cagliari e Sassari sia per quanto riguarda il clima passato (da Figura 14 a Figura 20) e presente sia per il clima futuro (da Figura 21 a Figura 26). I risultati di questa analisi di approfondimento sono riportati di seguito (vedi

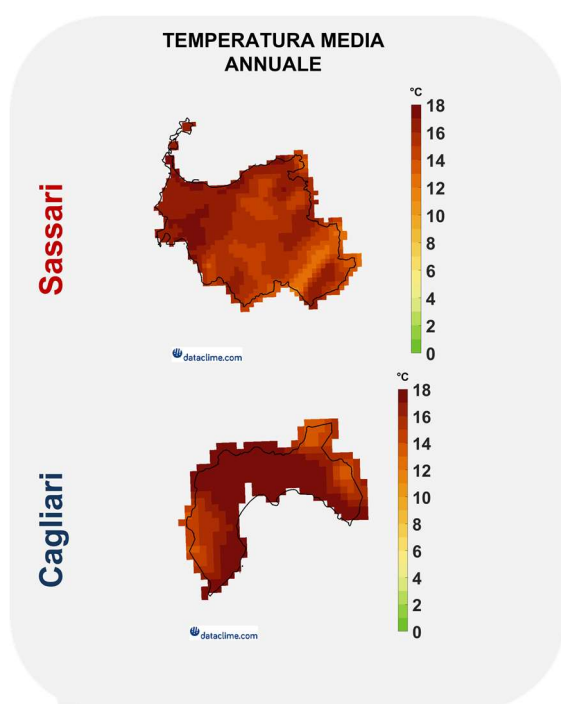


Figura 14: Temperatura media annuale, TG. Elaborazione rianalisi ERA5@2KM sul periodo 1981-2010

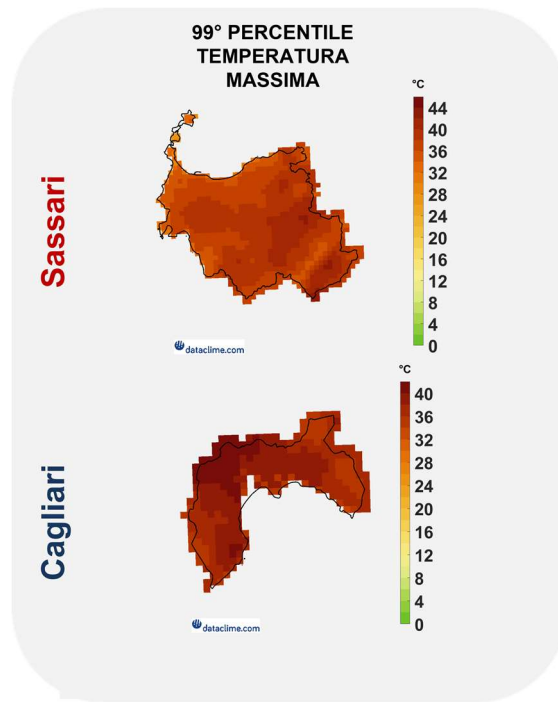


Figura 15: 99° Percentile della temperatura massima, TX99PRCTILE. Elaborazione rianalisi ERA5@2KM sul periodo 1981-2010

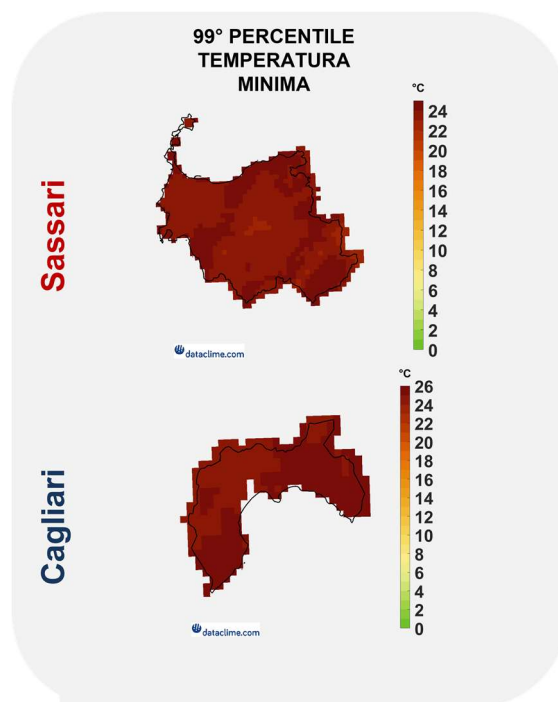


Figura 16: 99° Percentile della temperatura minima, TN99PRCTILE. Elaborazione rianalisi ERA5@2KM sul periodo 1981-2010

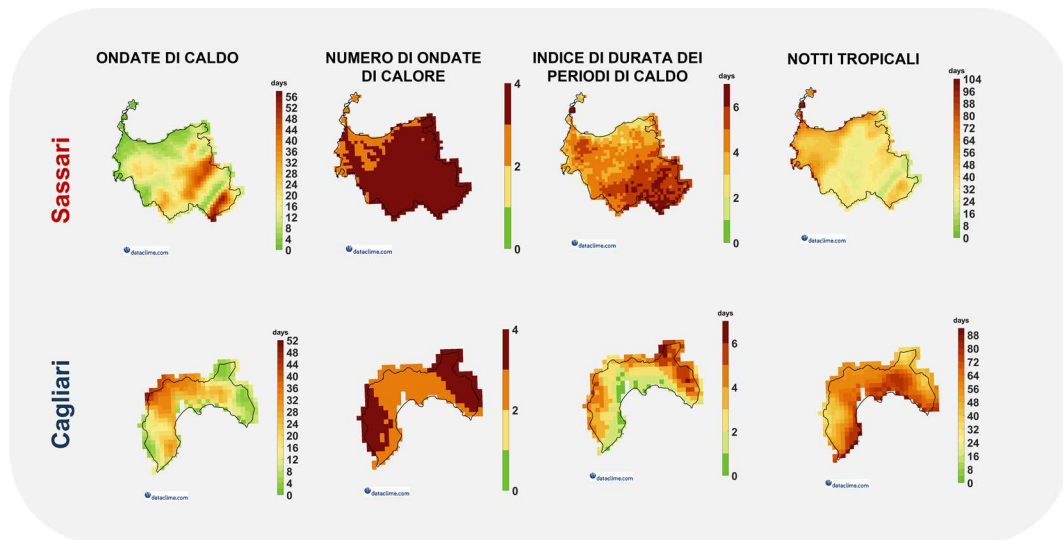


Figura 17: (da sinistra verso destra) ondate di caldo, HW; numero di ondate di calore, HWN; indice di durata dei periodi di caldo, WSDI; numero di notti tropicali, TR. Elaborazione rianalisi ERA5@2km sul periodo 1981-2010.

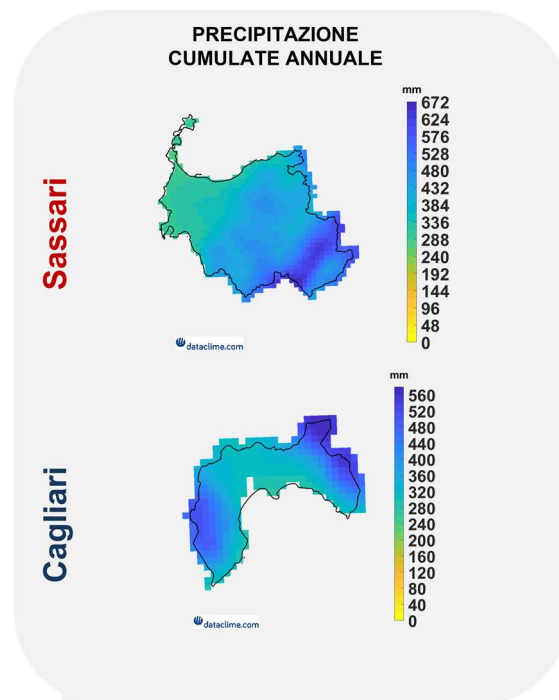


Figura 18: Precipitazione cumulata annuale, PRCPTOT. Elaborazione rianalisi ERA5@2KM sul periodo 1981-2010

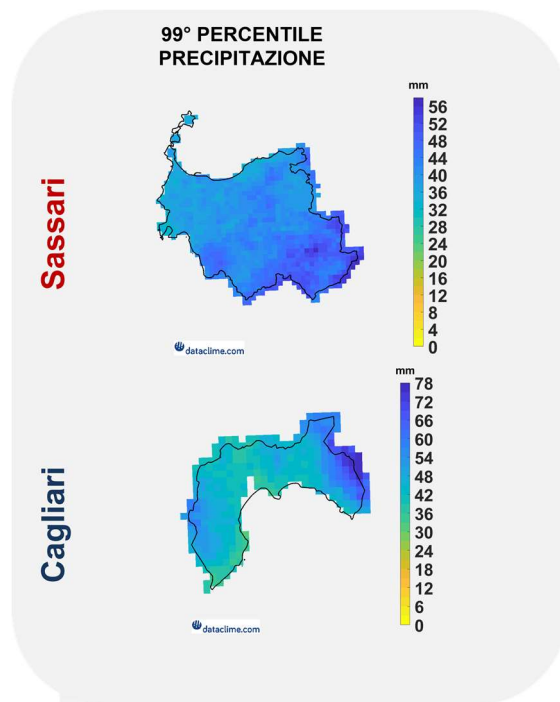


Figura 19: 99° percentile della precipitazione, PR99PRCTILE. Elaborazione rianalisi ERA5@2KM sul periodo 1981-2010

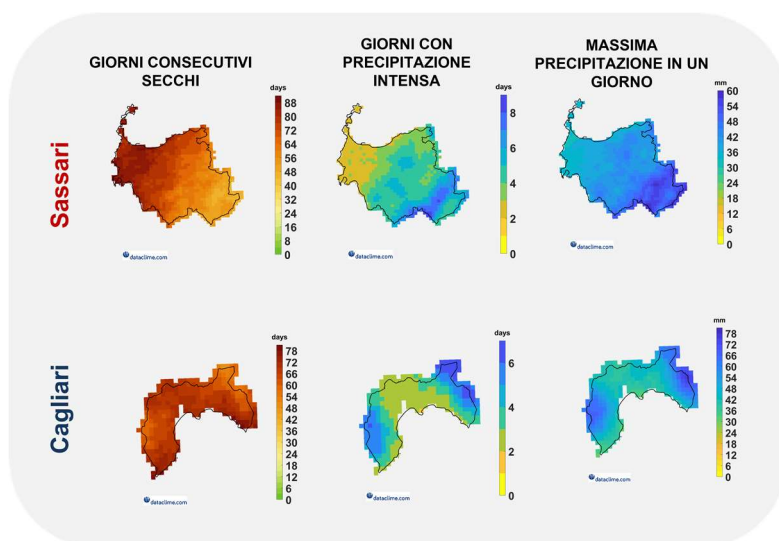


Figura 20: (a sinistra) giorni consecutivi secchi, CDD; (al centro) giorni con precipitazione intensa, R20; (a destra) massima precipitazione in 1-giorno, RX1DAY. Elaborazione rianalisi ERA5@2km sul periodo 1981-2010.



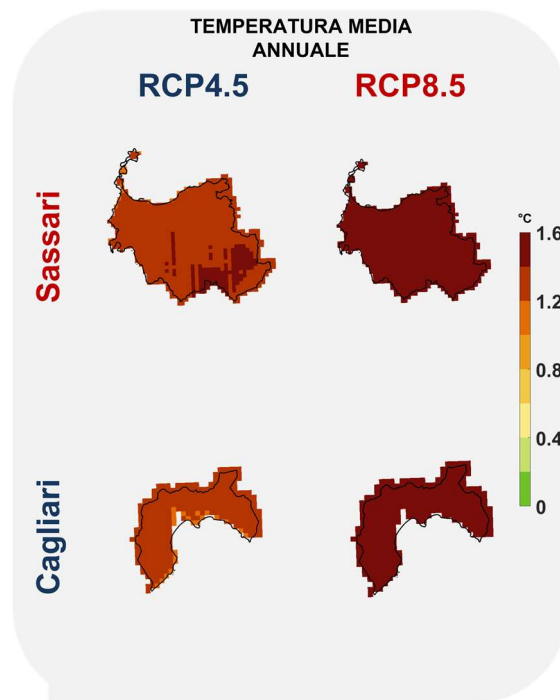


Figura 21: (in alto) Variazione di temperatura media annuale per la città metropolitana di Sassari, TG. (in basso) Variazione di temperatura media annuale per la città metropolitana di Cagliari, TG. Elaborazione proiezione climatica VHR-PRO\_IT sotto gli scenari RCP4.5 e RCP8.5 sul periodo 2021-2050 rispetto al riferimento 1981-2010

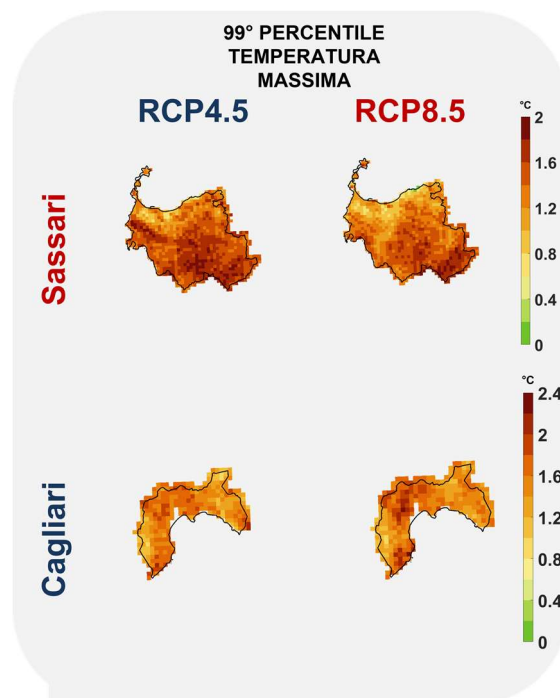


Figura 22: (in alto) Variazione del 99° percentile di temperatura massima per la città metropolitana di Sassari, TX99PRCTILE. (in basso) Variazione del 99° percentile di temperatura massima per la città metropolitana di Cagliari, TX99PRCTILE. Elaborazione proiezione climatica VHR-PRO\_IT sotto gli scenari RCP4.5 e RCP8.5 sul periodo 2021-2050 rispetto al riferimento 1981-2010

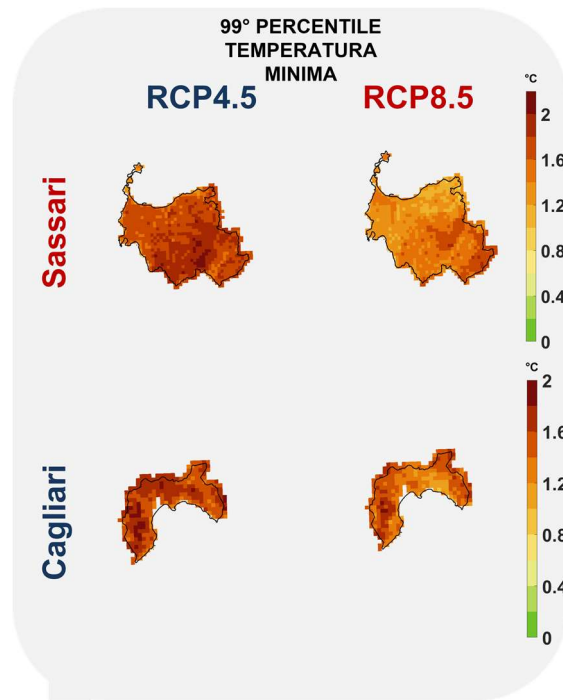


Figura 23: (in alto) Variazione del 99° percentile di temperatura minima per la città metropolitana di Sassari, TN99PRCTILE. (in basso) Variazione del 99° percentile di temperatura minima per la città metropolitana di Cagliari, TN99PRCTILE. Elaborazione proiezione climatica VHR-PRO\_IT sotto gli scenari RCP4.5 e RCP8.5 sul periodo 2021-2050 rispetto al riferimento 1981-2010

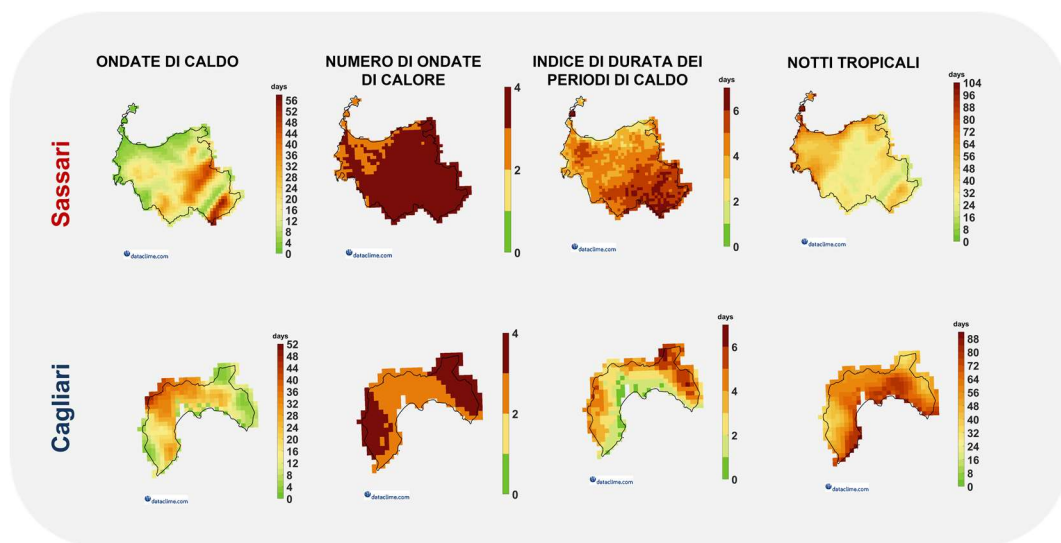


Figura 24: (in alto, per la città metropolitana di Sassari da sinistra verso destra) Variazione del numero di ondate di caldo, HW; Variazione del numero di ondate di calore, HWN; Variazione dell'indice di durata dei periodi di caldo, WSDI; Variazione del numero di notti tropicali, TR. (in basso, per la città metropolitana di Cagliari da sinistra verso destra) Variazione del numero di ondate di caldo, HW; Variazione del numero di ondate di calore, HWN; Variazione dell'indice di durata dei periodi di caldo, WSDI; Variazione del numero di notti tropicali, TR. Elaborazione proiezione climatica VHR-PRO\_IT sotto gli scenari RCP4.5 e RCP8.5 sul periodo 2021-2050 rispetto al riferimento 1981-2010.

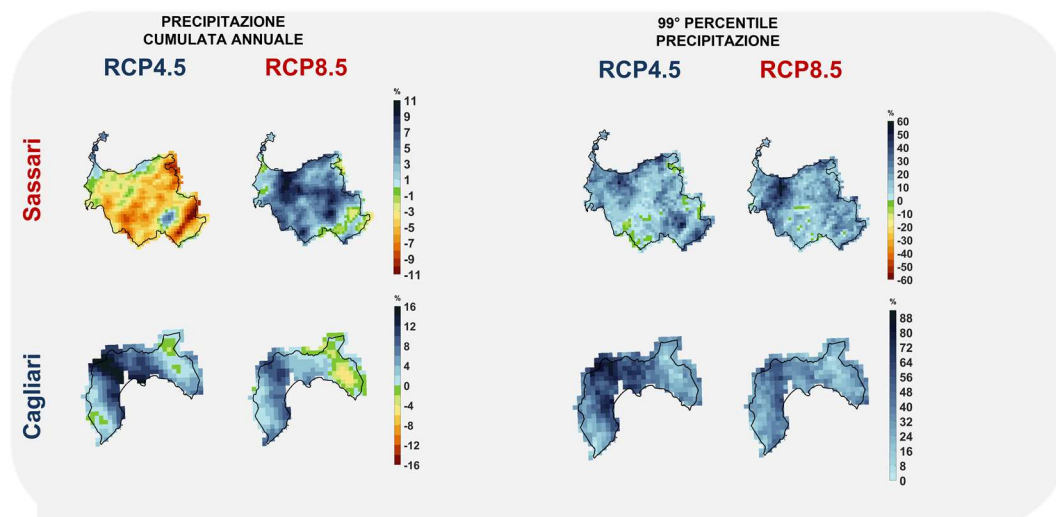


Figura 25: (in alto a sinistra) Variazione della precipitazione cumulata annuale, per la città metropolitana di Sassari, PRCPTOT; (in alto a destra) Variazione del 99° percentile della precipitazione, per la città metropolitana di Sassari, PR99prctile. (in basso a sinistra) Variazione della precipitazione cumulata annuale, per la città metropolitana di Cagliari, PRCPTOT; (in basso a destra) Variazione del 99° percentile della precipitazione, per la città metropolitana di Cagliari, PR99prctile. Elaborazione proiezione climatica VHR-PRO\_IT sotto gli scenari RCP4.5 e RCP8.5 sul periodo 2021-2050 rispetto al riferimento 1981-2010.

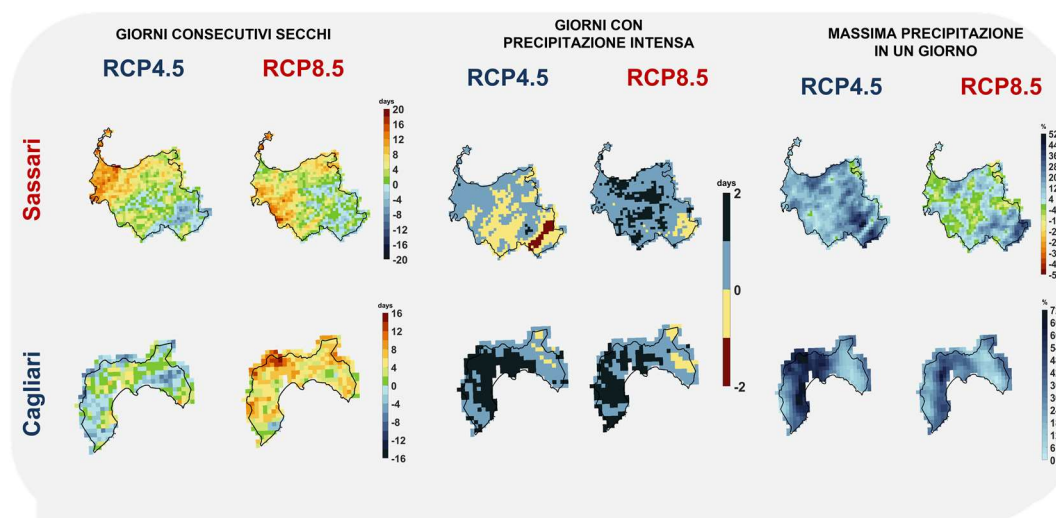


Figura 26: (in alto da sinistra a destra per la città metropolitana di Sassari) Variazione del numero massimo di giorni consecutivi secchi, CDD; Variazione del numero giorni con precipitazione intensa, R20; Variazione della massima precipitazione in 1-giorno, RX1DAY. (in basso da sinistra a destra per la città metropolitana di Cagliari) Variazione del numero massimo di giorni consecutivi secchi, CDD; Variazione del numero giorni con precipitazione intensa, R20; Variazione della massima precipitazione in 1-giorno, RX1DAY. Elaborazione proiezione climatica VHR-PRO\_IT sotto gli scenari RCP4.5 e RCP8.5 sul periodo 2021-2050 rispetto al riferimento 1981-2010.

Tabella 4).

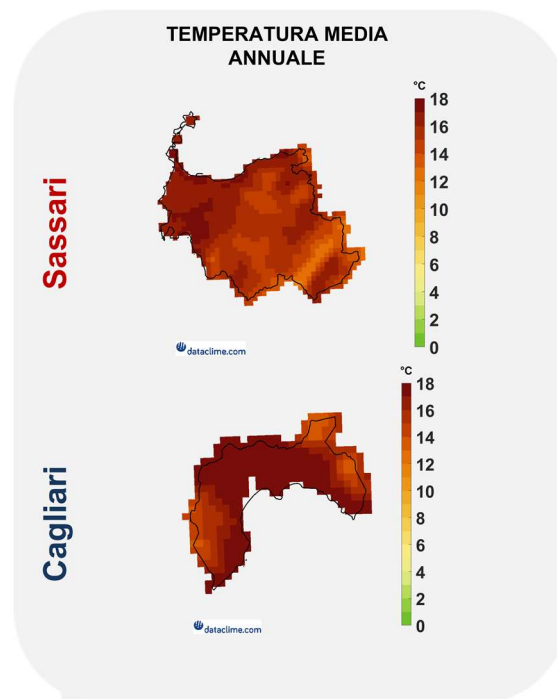


Figura 14: Temperatura media annuale, TG. Elaborazione rianalisi ERA5@2KM sul periodo 1981-2010

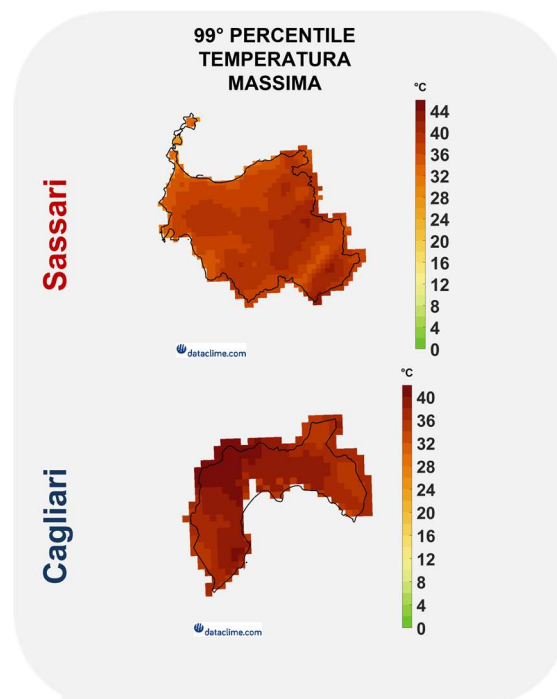


Figura 15: 99° Percentile della temperatura massima, TX99PRCTILE. Elaborazione rianalisi ERA5@2KM sul periodo 1981-2010

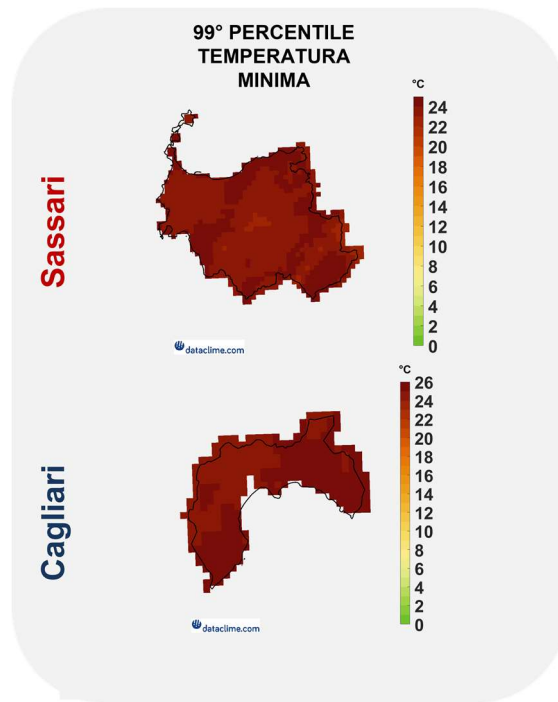


Figura 16: 99° Percentile della temperatura minima, TN99PRCTILE. Elaborazione rianalisi ERA5@2KM sul periodo 1981-2010

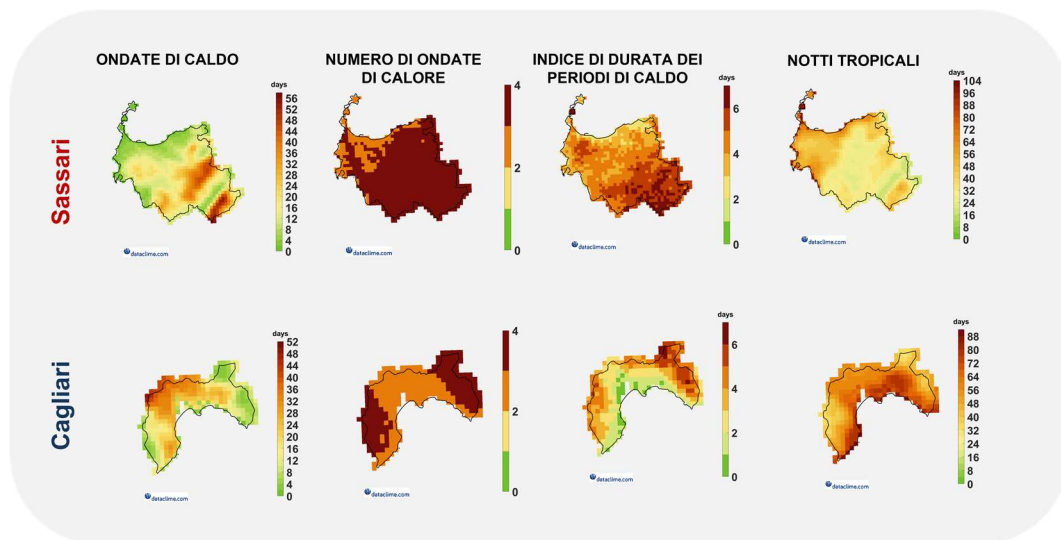


Figura 17: (da sinistra verso destra) ondate di caldo, HW; numero di ondate di calore, HWN; indice di durata dei periodi di caldo, WSDI; numero di notti tropicali, TR. Elaborazione rianalisi ERA5@2km sul periodo 1981-2010.

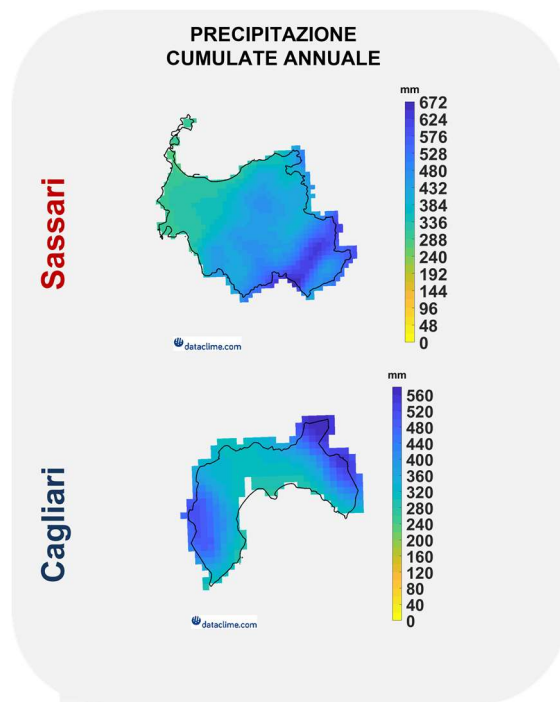


Figura 18: Precipitazione cumulata annuale, PRCPTOT. Elaborazione rianalisi ERA5@2KM sul periodo 1981-2010

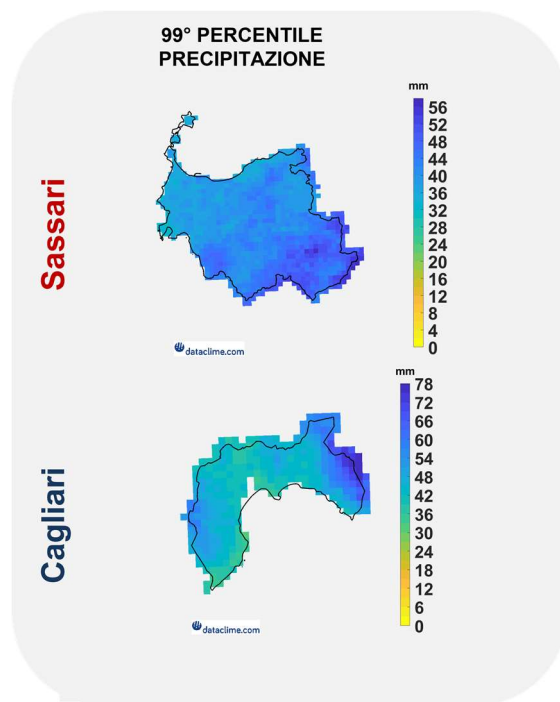


Figura 19: 99° percentile della precipitazione, PR99PRCTILE. Elaborazione rianalisi ERA5@2KM sul periodo 1981-2010

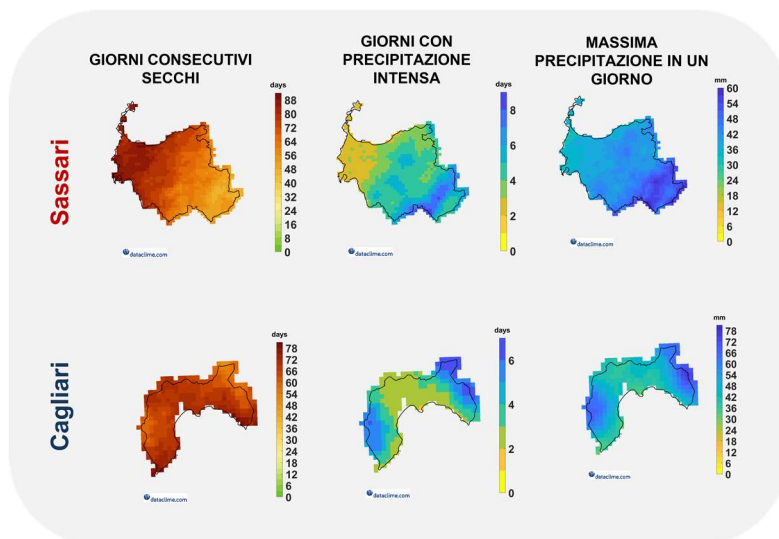


Figura 20: (a sinistra) giorni consecutivi secchi, CDD; (al centro) giorni con precipitazione intensa, R20; (a destra) massima precipitazione in 1-giorno, RX1DAY. Elaborazione rianalisi ERA5@2km sul periodo 1981-2010.

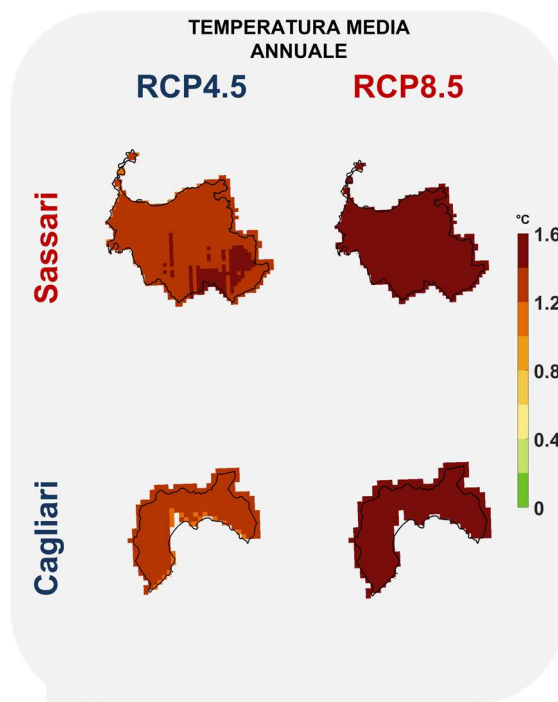


Figura 21: (in alto) Variazione di temperatura media annuale per la città metropolitana di Sassari, TG. (in basso) Variazione di temperatura media annuale per la città metropolitana di Cagliari, TG. Elaborazione proiezione climatica VHR-PRO\_IT sotto gli scenari RCP4.5 e RCP8.5 sul periodo 2021-2050 rispetto al riferimento 1981-2010

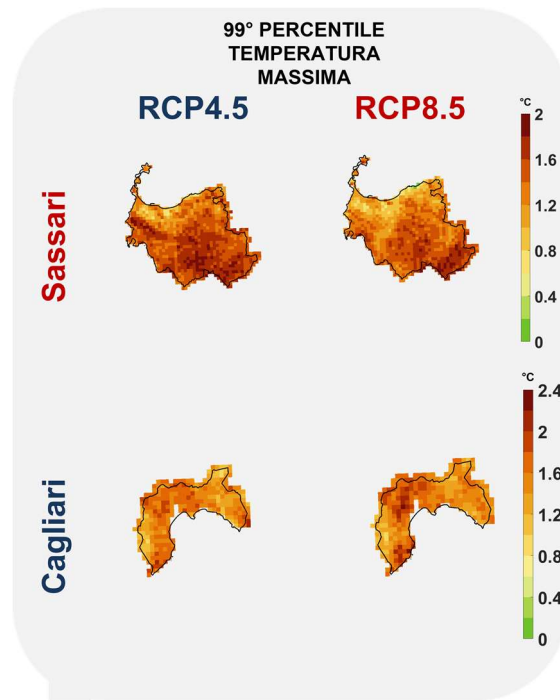


Figura 22: (in alto) Variazione del 99° percentile di temperatura massima per la città metropolitana di Sassari, TX99PRCTILE. (in basso) Variazione del 99° percentile di temperatura massima per la città metropolitana di Cagliari, TX99PRCTILE. Elaborazione proiezione climatica VHR-PRO\_IT sotto gli scenari RCP4.5 e RCP8.5 sul periodo 2021-2050 rispetto al riferimento 1981-2010

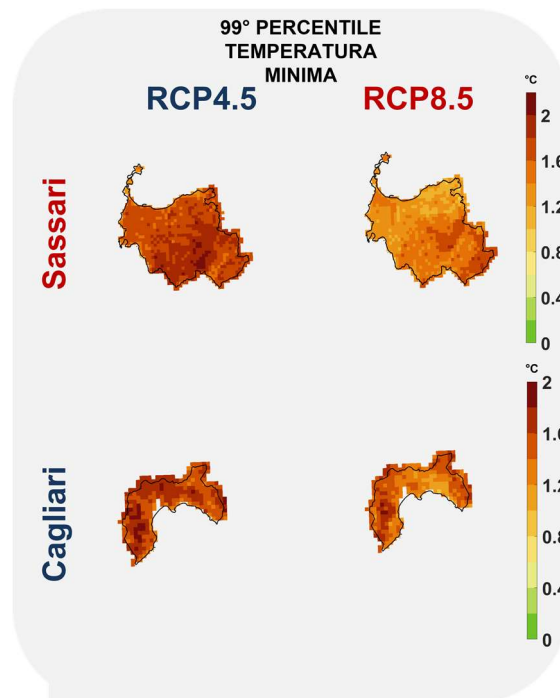


Figura 23: (in alto) Variazione del 99° percentile di temperatura minima per la città metropolitana di Sassari, TN99PRCTILE. (in basso) Variazione del 99° percentile di temperatura minima per la città metropolitana di Cagliari, TN99PRCTILE. Elaborazione proiezione climatica VHR-PRO\_IT sotto gli scenari RCP4.5 e RCP8.5 sul periodo 2021-2050 rispetto al riferimento 1981-2010



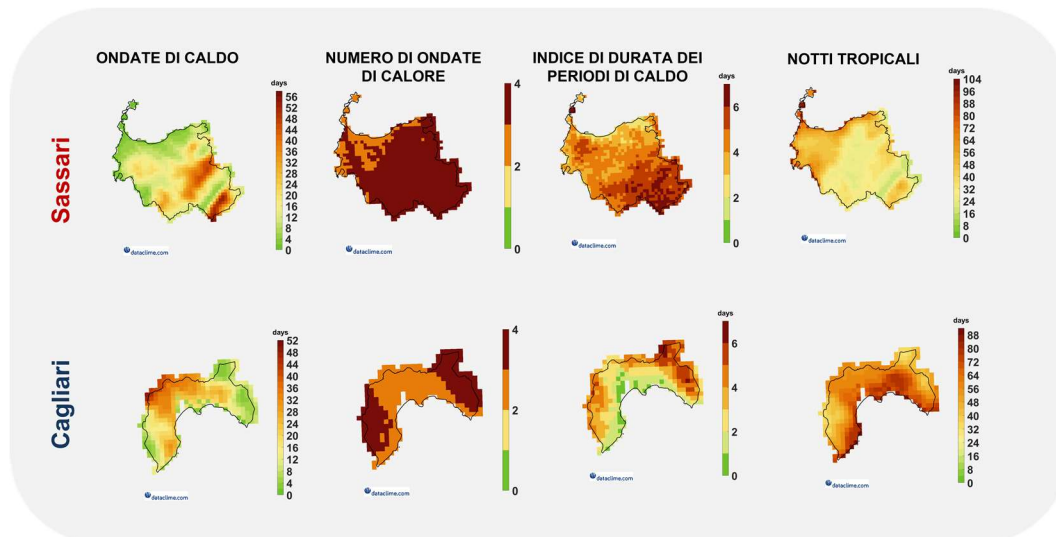


Figura 24: (in alto, per la città metropolitana di Sassari da sinistra verso destra) Variazione del numero di ondate di caldo, HW; Variazione del numero di ondate di calore, HWN; Variazione dell'indice di durata dei periodi di caldo, WSDI; Variazione del numero di notti tropicali, TR. (in basso, per la città metropolitana di Cagliari da sinistra verso destra) Variazione del numero di ondate di caldo, HW; Variazione del numero di ondate di calore, HWN; Variazione dell'indice di durata dei periodi di caldo, WSDI; Variazione del numero di notti tropicali, TR. Elaborazione proiezione climatica VHR-PRO\_IT sotto gli scenari RCP4.5 e RCP8.5 sul periodo 2021-2050 rispetto al riferimento 1981-2010.

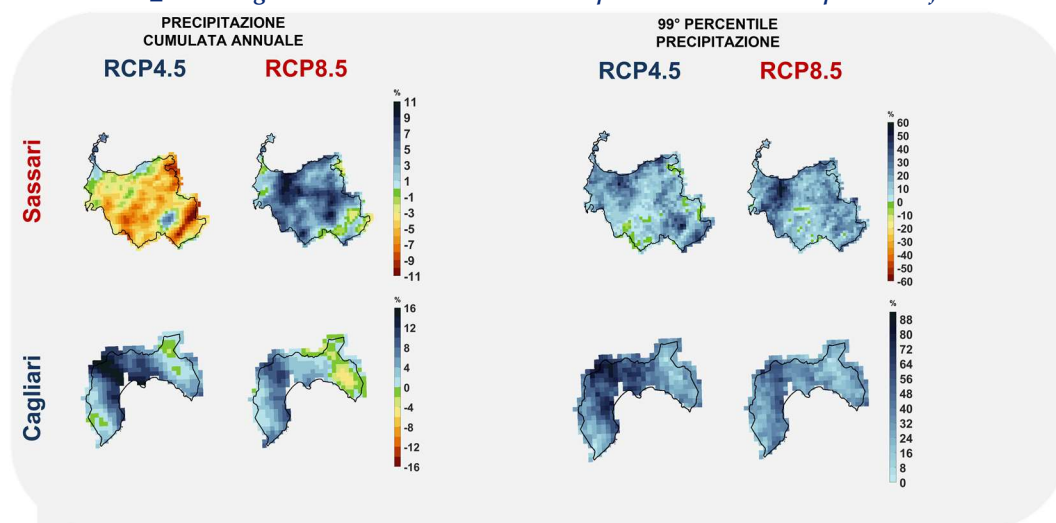


Figura 25: (in alto a sinistra) Variazione della precipitazione cumulata annuale, per la città metropolitana di Sassari, PRCPTOT; (in alto a destra) Variazione del 99° percentile della precipitazione, per la città metropolitana di Sassari, PR99prctile. (in basso a sinistra) Variazione della precipitazione cumulata annuale, per la città metropolitana di Cagliari, PRCPTOT; (in basso a destra) Variazione del 99° percentile della precipitazione, per la città metropolitana di Cagliari, PR99prctile. Elaborazione proiezione climatica VHR-PRO\_IT sotto gli scenari RCP4.5 e RCP8.5 sul periodo 2021-2050 rispetto al riferimento 1981-2010.

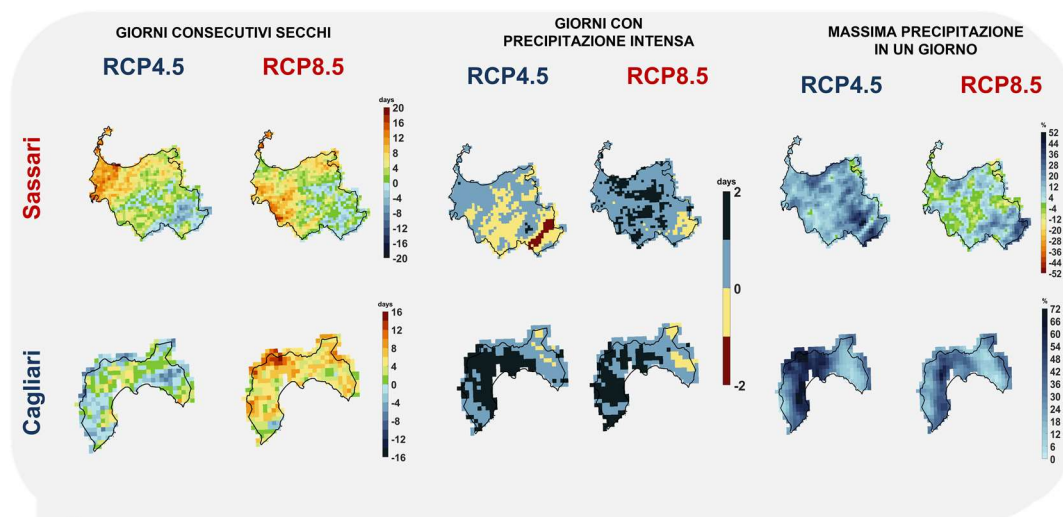


Figura 26: (in alto da sinistra a destra per la città metropolitana di Sassari) Variazione del numero massimo di giorni consecutivi secchi, CDD; Variazione del numero giorni con precipitazione intensa, R20; Variazione della massima precipitazione in 1-giorno, RX1DAY. (in basso da sinistra a destra per la città metropolitana di Cagliari) Variazione del numero massimo di giorni consecutivi secchi, CDD; Variazione del numero giorni con precipitazione intensa, R20; Variazione della massima precipitazione in 1-giorno, RX1DAY. Elaborazione proiezione climatica VHR-PRO\_IT sotto gli scenari RCP4.5 e RCP8.5 sul periodo 2021-2050 rispetto al riferimento 1981-2010.

Tabella 4: (sinistra) Medie spaziali degli indicatori calcolati sulle città metropolitane di Cagliari e di Sassari a partire dalla rianalisi ERA5-2km per il periodo 1981-2010; (destra) Variazioni delle medie spaziali annuali degli indicatori climatici calcolati per le città metropolitane di Cagliari e Sassari considerando il periodo 2021-2050 rispetto al 1981-2010 sotto gli scenari IPCC RCP4.5 e RCP8.5

Indicatore	Cagliari	Sassari
	ERA5@2km	ERA5@2km
TG (°C)	16.8	15.6
TX95PRCTILE (°C)	34.8	34.4
TX99PRCTILE (°C)	38.2	38.1
TXX (°C)	40.3	40.3
TN99PRCTILE (°C)	25.2	23.8
TNX (°C)	26.4	25.0
PRCPTOT (mm)	382	426
R20 (giorni)	4	4
RX1DAY (mm/giorni)	48	42
RX5DAY (mm/giorni)	68	68

Indicatore	Cagliari		Sassari	
	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
TG (°C)	1.3	1.5	1.3	1.5
TX95PRCTILE (°C)	1.5	1.6	1.6	1.5
TX99PRCTILE (°C)	1.5	1.6	1.5	1.4
TXX (°C)	1.5	1.8	1.2	1.4
TN99PRCTILE (°C)	1.6	1.4	1.8	1.4
TNX (°C)	1.7	1.4	1.6	1.4
PRCPTOT (%)	6	3	-4	4
R20 (giorni)	1	1	0	1
RX1DAY (%)	37	28	16	20
RX5DAY (%)	29	27	5	14

PR95PRCTILE (mm)	24	24
PR99PRCTILE (mm)	47	42
R99PTOT (%)	8	6
TR100PR (mm)	124	93
CDD (giorni)	67	69
ID (giorni)	0	0
WSDI (giorni)	3	5
HW (giorni)	19	17
HWN (occorrenza)	3	3
TR (giorni)	60	37

PR95PRCTILE (%)	23	21	7	13
PR99PRCTILE (%)	43	32	16	19
R99PTOT (%)	8	6	3	5
TR100PR (%)	49	38	33	32
CDD (giorni)	0	5	4	4
ID (giorni)	0	0	-1	-1
WSDI (giorni)	12	10	15	11
HW (giorni)	6	7	8	7
HWN (%)	113	128	113	105
TR (giorni)	19	21	16	14

I valori medi annuali degli indicatori selezionati per le due città metropolitane caratterizzate sono in linea con quanto osservato su scala regionale per quanto riguarda il clima sul periodo di riferimento (rianalisi ERA5@2km sul periodo 1981-2020).

Nello specifico, la città metropolitana di Cagliari mostra un valore annuale medio di temperatura media (TG) di 16.8 °C che risulta essere di circa 1 °C in più rispetto alla città metropolitana di Sassari. Ciò accade anche per i valori estremi di temperatura minima (TN99PRCTILE) che, per la città metropolitana di Cagliari, risultano essere rispettivamente di 25.2°C e 23.8°C (differenza di circa 1.4°C). Inoltre, la città metropolitana di Cagliari, rispetto alla città metropolitana di Sassari, restituisce un numero di ondate di caldo (HW) leggermente superiore (19 per Cagliari contro 17 per Sassari) sebbene di durata inferiore (WSDI, 3 per Cagliari contro 5 per Sassari). Infine, il numero di giorni con temperature minime elevate (TR) risulta essere maggiore per la città metropolitana di Cagliari che registra mediamente 60 giorni l'anno con temperatura minima superiore ai 20 °C, rispetto ai 37 giorni l'anno della città metropolitana di Sassari. Per quanto riguarda gli indicatori di precipitazione, la città metropolitana di Sassari è caratterizzata mediamente da precipitazioni cumulate sull'anno lievemente maggiori rispetto alla città metropolitana di Cagliari (382 mm contro 426 mm). Al contrario, gli indicatori di estremi di precipitazione RX1DAY e PR99PRCTILE sono leggermente maggiori per la città metropolitana di Cagliari (48 mm e 47 mm) rispetto alla città metropolitana di Sassari (42 mm per entrambi gli indicatori). Infine, sia la città metropolitana di Cagliari sia la città metropolitana di Sassari sono caratterizzate da valori simili del massimo numero di giorni consecutivi con assenza di pioggia (CDD) simile (circa 67 giorni per Cagliari e circa 70 giorni Sassari) e del numero di giorni l'anno di precipitazione intensa (R20, circa 4 giorni per entrambe le città).

Per quanto riguarda le variazioni attese sul futuro degli indicatori selezionati per le due città oggetto di studio, i risultati sono in linea con quanto emerso sull'interna regione, sebbene con delle differenze per gli indicatori relativi agli estremi di precipitazione, in particolare sulla città metropolitana di Cagliari. A titolo di esempio, per la città di Cagliari è atteso un aumento della massima precipitazione su 1-giorno (RX1DAY) del 37% per lo scenario RCP4.5 e 28% per lo scenario RCP8.5 rispetto alla città di Sassari per la quale l'aumento è limitato al 16% per lo scenario RCP4.5 e del 20% per lo scenario RCP8.5. Una simile tendenza è attesa per la variazione del 99° percentile

---

della precipitazione (PR99PRCTILE, con aumenti nelle ipotesi di scenario RCP4.5 e RCP8.5 rispettivamente del 43% e 32% per la città di Cagliari e del 16% e 19% per la città di Sassari).

## Conclusioni

Il presente elaborato ha delineato le caratteristiche del clima passato e presente (periodo di riferimento 1981-2010) e del clima futuro atteso (2021-2050 rispetto al 1981-2010) per la regione Sardegna. I risultati più rilevanti sono i seguenti:

- Per quanto riguarda il clima sul periodo di riferimento, la Sardegna è caratterizzata da valori della temperatura media annuale di circa 16°C (variabilità su scala regionale di circa 2°C), minori (tra 8 e 14°C) nelle aree montuose (costituite dai Monti Limbara a nord, dal massiccio dei Monti del Gennargentu nella zona centro orientale e dai Monti di Alà, del Goceano, del Marghine ad occidente) e maggiori (fino a 18°C) nelle aree pianeggianti (soprattutto nell'area meridionale della regione). Per quanto riguarda le precipitazioni, valori maggiori sono caratteristici del territorio montuoso mentre valori ridotti sono tipici dell'area pianeggiante sud-occidentale della regione; in particolare, le precipitazioni cumulate annue sono di circa 456 mm con una variabilità su scala regionale di circa 122 mm. Questi valori possono raggiungere più di 1000 mm all'anno su Punta La Marmora, la vetta più alta del massiccio dei Monti del Gennargentu.
- Per quanto riguarda il clima futuro, le analisi evidenziano un generale aumento della temperatura media e, su gran parte della regione, degli estremi di temperatura massima e minima, dei periodi con temperature elevate, della frequenza degli eventi estremamente caldi e delle notti tropicali. Allo stesso tempo, in termini di precipitazione, lo scenario RCP4.5 restituisce una riduzione della precipitazione cumulate annua a nord e un aumento al sud, mentre con lo scenario RCP8.5 mostra un generale aumento delle precipitazioni annue su tutta la regione, ad eccezione di una lieve riduzione in alcune aree situate nella parte nord-orientale e meridionale della Sardegna. Per entrambi gli scenari considerati, su gran parte dell'area studio è atteso un incremento dei valori massimi di pioggia in 1-giorno e degli estremi di precipitazione. In termini di numero di giorni consecutivi all'anno con precipitazione minore di 1 millimetro, la proiezione con lo scenario RCP4.5 mostra un aumento dei valori annuali sulla parte settentrionale della regione e una riduzione in gran parte del centro e del sud. Di contro, la proiezione con lo scenario RCP8.5 mostra un aumento generalizzato sull'intera regione.
- Per quanto attiene le città metropolitane di Cagliari e Sassari i risultati ottenuti risultano essere in linea con quanto osservato su scala regionale.

## Bibliografia

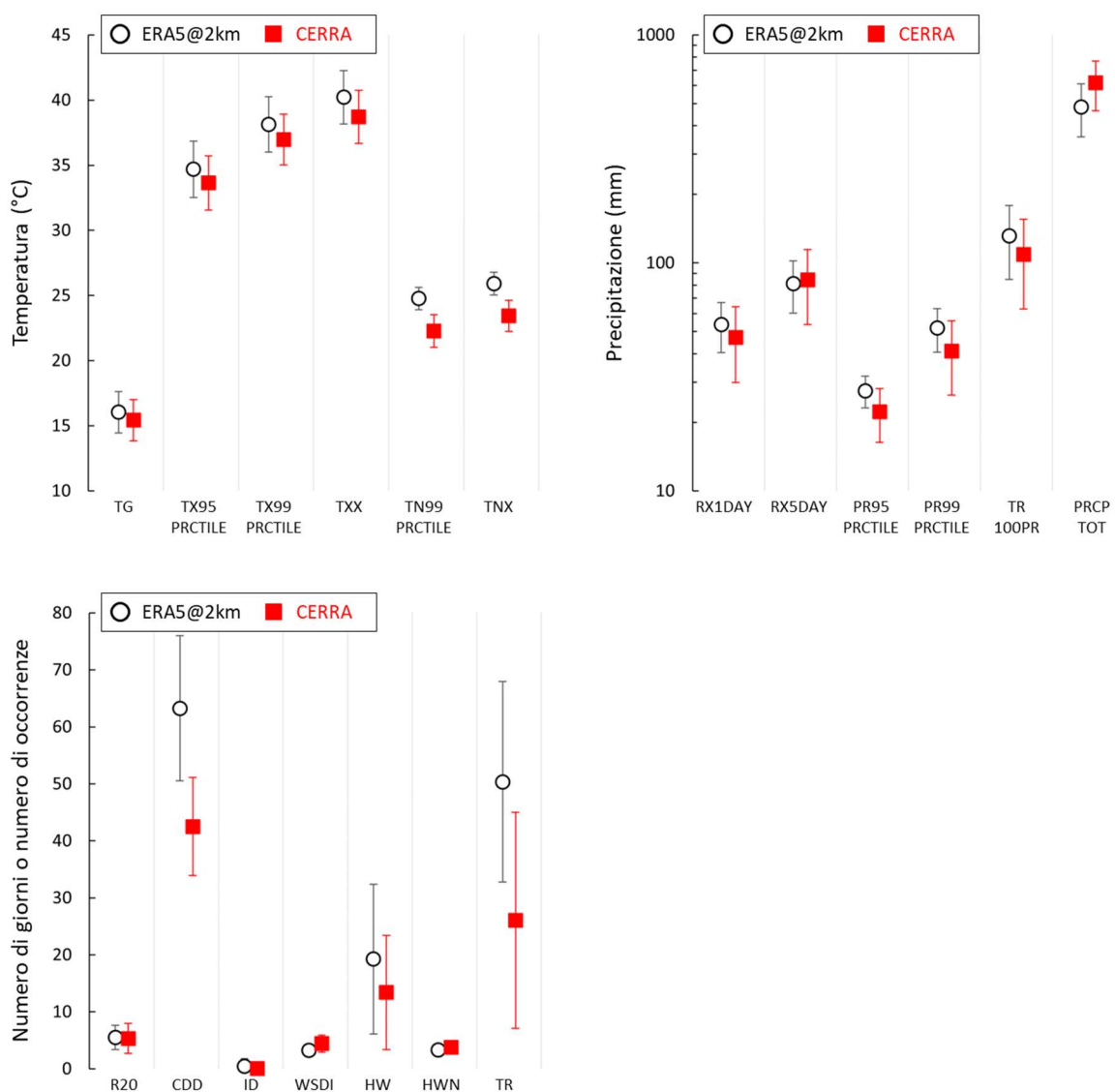
Adinolfi, M., Raffa, M., Reder, A., Mercogliano, P. (2021). Evaluation and Expected Changes of Summer Precipitation at Convection Permitting Scale with COSMO-CLM over Alpine Space. *Atmosphere* 12(1), 54. <https://doi.org/10.3390/atmos12010054>.

- 
- Bucchignani, E., Montesarchio, M., Zollo, A.L., Mercogliano, P. (2016). High-resolution climate simulations with COSMO-CLM over Italy: performance evaluation and climate projections for the 21st century. *Int J Climatol* 36(2), 735–756. <https://doi.org/10.1002/joc.4379>.
- Collins, M., 2007. Ensembles and probabilities: a new era in the prediction of climate change. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 365.1857, 1957-1970. <http://doi.org/10.1098/rsta.2007.2068>
- European Environmental Agency (2009). Regional Climate Change and Adaptation: The Alps Facing the Challenge of Changing Water Resources. EEA Report No 8/2009. <http://doi.org/10.2800/12552>.
- European Environmental Agency (2018). National climate change vulnerability and risk assessments in Europe. EEA Report No 1/2018. <http://doi.org/10.2800/348489>.
- Hausfather, Z., Peters, G.P. (2020). Emissions – the ‘business as usual’ story is misleading. *Nature* 577, 618–620. <https://doi.org/10.1038/d41586-020-00177-3>.
- Hersbach, H. *et al.* (2020). The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 146, 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.
- IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: *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.
- IPCC (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. ISBN 978-92-9169-143-2.
- IPCC (2021). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V. *et al.* (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3–32. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>.
- Jacob, D. *et al.* (2014). EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change* 14(2), 563-578. <http://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>.
- Karl, T.R., Nicholls, N., Ghazi, A. (1999). CLIVAR/GCOS/WMO Workshop on Indices and Indicators for Climate Extremes Workshop Summary. In: Karl, T.R., Nicholls, N., Ghazi, A. (Eds.), *Weather and Climate Extremes*. Springer, Dordrecht, pp. 3-7. [https://doi.org/10.1007/978-94-015-9265-9\\_2](https://doi.org/10.1007/978-94-015-9265-9_2).
- Kendon, E.J., Prein, A.F., Senior, C.A., Stirling, A. (2021). Challenges and outlook for convection-permitting climate modelling. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 379, 20190547. <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0547>.
- Lucas-Picher, P. *et al.* (2021). Convection-permitting modeling with regional climate models: Latest developments and next steps. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 12, e731. <https://doi.org/10.1002/wcc.731>.

- 
- Peterson, T., Folland, C., Gruza, G., Hogg, W., Mokssit, A., Plummer, N. (2001). Report on the activities of the working group on climate change detection and related rapporteurs. World Meteorological Organization, Geneva.
- Prein, A.F. *et al.* (2015). A review on regional convection-permitting climate modeling: Demonstrations, prospects, and challenges. *Rev. Geophys.* 53,323–361. <https://doi.org/10.1002/2014RG000475>.
- Raffa, M., Reder, A., Marras, G. F., Mancini, M., Scipione, G., Santini, M., Mercogliano, P. (2021). VHR-REA\_IT Dataset: Very High-Resolution Dynamical Downscaling of ERA5 Reanalysis over Italy by COSMO-CLM. *Data* 6(8), 88. <https://doi.org/10.3390/data6080088>.
- Raffa, M., Adinolfi, M., Reder, A. *et al.* Very High Resolution Projections over Italy under different CMIP5 IPCC scenarios. *Sci Data* 10, 238 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02144-9>
- Reder, A., Raffa, M., Padulano, R., Rianna, G., Mercogliano, P. (2022). Characterizing extreme values of precipitation at very high resolution: An experiment over twenty European cities. *Weather and Climate Extremes* 35, 100407. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100407>.
- Rockel, B., Will, A., Hence, A. (2008). The regional climate model COSMO-CLM (CCLM). *Meteorol. Z.* 17, 347–348. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2008/0309>.
- Schimanke, S. *et al.* (2021). CERRA sub-daily regional reanalysis data for Europe on single levels from 1984 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). <https://doi.org/10.24381/cds.622a565a>.
- Van Vuuren, D.P. *et al.* (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change* 109(1), 5-31. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>.
- Von Trentini, F., Leduc, M., Ludwig, R. (2019). Assessing natural variability in RCM signals: comparison of a multi model EURO-CORDEX ensemble with a 50-member single model large ensemble. *Climate Dynamics* 53(3), 1963-1979. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04755-8>.

## Allegato 1: Confronto tra la rianalisi ERA5@2km e la rianalisi CERRA sul periodo 1991-2020 attraverso indicatori climatici

Di seguito (**Figura A1**) sono confrontati gli indicatori di **Tabella 1** calcolati attraverso ERA5@2km con quelli ottenuti attraverso la rianalisi CERRA, la quale condivide con ERA5@2km lo stesso modello “genitore” ed una risoluzione spaziale paragonabile. Tale confronto è stato effettuato sul periodo comune 1991-2020. In particolare, gli indicatori sono stati raggruppati in base all’unità di misura che alcuni di essi condividono e rappresentati in **Figura A1**. Per ciascun indicatore, è confrontata la media spaziale sull’area oggetto di studio (simbolo) e la sua variabilità spaziale valutata in termini di deviazione standard spaziale (barra verticale).



**Figura A1:** Indicatori climatici calcolati sul periodo 1991-2020 attraverso ERA5@2km e CERRA: (in alto a sinistra) indicatori di temperatura espressi in °C (TG, TX95PRCTILE, TX99PRCTILE, TXX, TN99PRCTILE, TNX); (in alto a destra) indicatori di precipitazione espressi in mm (RX1DAY, RX5DAY, PR95PRCTILE, PR99PRCTILE, TR100PR, PRCPTOT); (in basso a sinistra) indicatori di temperatura e di precipitazione espressi in numeri di giorni o numero di occorrenze (R20, CDD, ID, WSDI, HW, HWN, TR). Per ciascun indicatore, il simbolo indica la media spaziale mentre la barra denota la variabilità spaziale in termini di deviazione standard.

---

Il suddetto confronto tra indicatori mostra che:

- Per quanto riguarda gli indicatori di temperatura in °C, ERA5@2km restituisce valori leggermente maggiori rispetto a CERRA per gli indicatori legati alla temperatura media (TG) e alla temperatura massima (TX95PRCTILE, TX99PRCTILE e TXX) con valori che comunque ricadono nella zona di variabilità di CERRA; tali differenze diventano più marcate in riferimento agli indicatori legati alla temperatura minima (TN99PRCTILE e TNX) mettendo in luce una tendenza di ERA5@2km ad essere più calda di CERRA rispetto a questa caratteristica di temperatura.
- Per quanto riguarda gli indicatori di precipitazione in mm, è interessante sottolineare che se ERA5@2km è meno piovosa come simulazione rispetto a CERRA per indicatori che accumulano la precipitazione (ovvero PRCPTOT e RX5DAY), si ha un comportamento opposto per indicatori su estremi di precipitazione giornalieri (RX1DAY, PR95PRCTILE, PR99PRCTILE e RT100PR); ad ogni modo, per entrambe le simulazioni gli indicatori di precipitazione in mm condividono in parte la banda di variabilità spaziale.
- Per quanto riguarda gli indicatori di temperatura e di precipitazione espressi come numero di giorni o numero di occorrenze, si riflettono le tendenze espresse ai due punti precedenti; è da notare, da un lato, che ERA5@2km ha una maggiore durata del numero massimo di giorni consecutivi con precipitazione giornaliera minore di 1 mm (CDD) e dall'altro; dall'altro lato, ERA5@2km restituisce valori decisamente maggiori di notti tropicali (TR) in relazione alla sua tendenza ad essere più calda in termini di temperatura minima rispetto a CERRA.



## Allegato 2: Analisi di consistenza tra VHR-PRO\_IT e l'ensemble mean EURO-CORDEX attraverso indicatori climatici

I risultati ottenuti a partire dalla proiezione climatica denominato VHR-PRO\_IT che utilizzano gli scenari RCP4.5 e RCP8.5 sono confrontati con quelli relativi al valore medio (noto come *ensemble mean* e ottenuto a partire dai valori dei singoli modelli che rappresentano l'ensemble) del sotto-insieme di proiezioni EURO-CORDEX ad una risoluzione orizzontale di circa 12 km che sono state utilizzate. In particolare, l'utilizzo di queste proiezioni consente di valutare la dispersione (incertezza) dei singoli modelli intorno al loro valore medio. La stima dell'incertezza è ottenuta utilizzando come valore di sintesi la deviazione standard inter-modello: quanto più è basso il valore di deviazione standard tanto più sarà elevato il grado di accordo tra i modelli climatici dell'ensemble EURO-CORDEX, e viceversa.

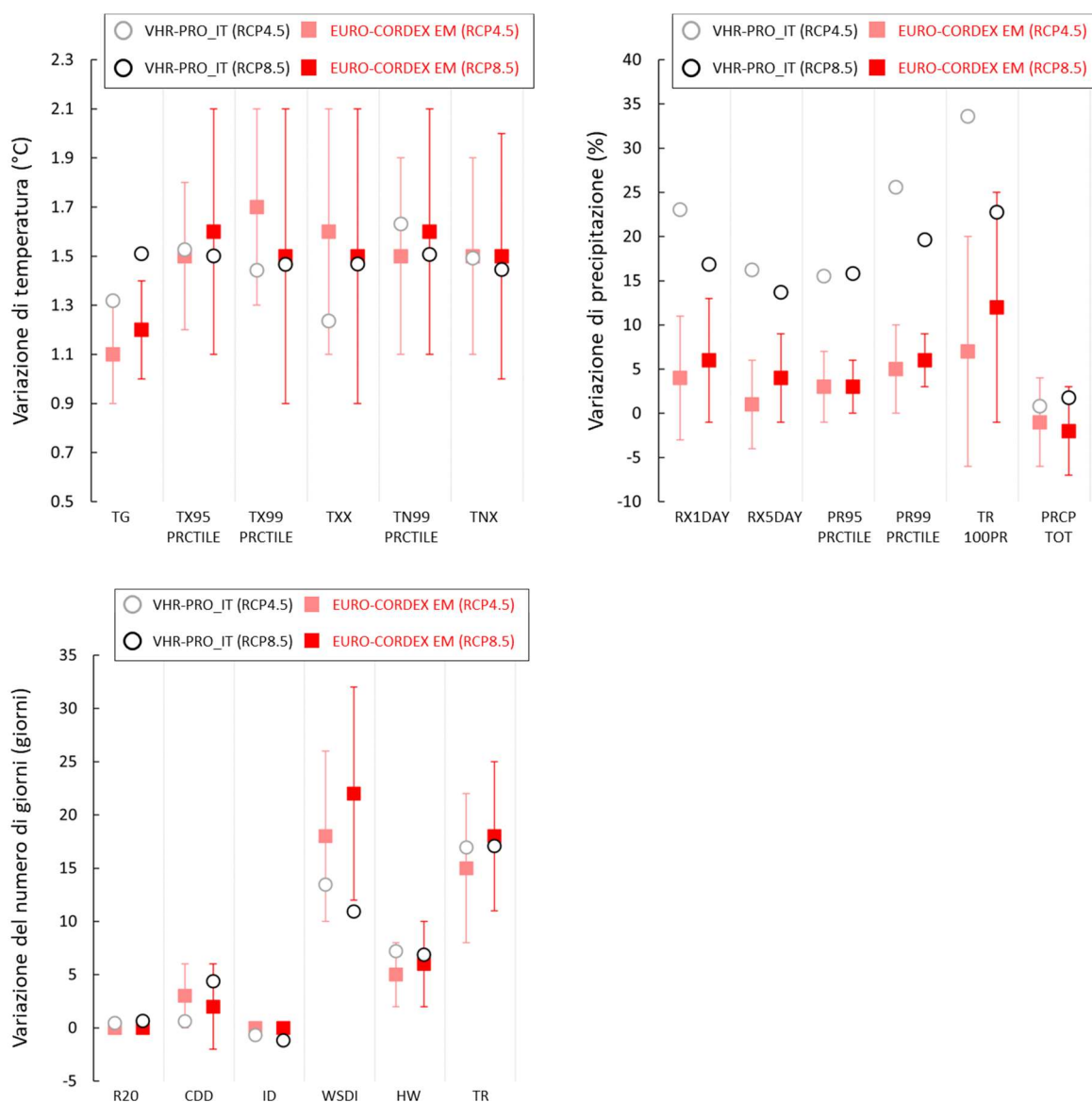


Figura A2: Variazione degli Indicatori climatici calcolati sul periodo 2021-2050 rispetto al 1981-2010 attraverso la proiezione VHR-PRO\_IT e l'ensemble mean EURO-CORDEX sotto gli scenari RCP4.5 e RCP8.5: (in alto a sinistra)

---

*indicatori di temperatura espressi in °C (TG, TX95PRCTILE, TX99PRCTILE, TXX, TN99PRCTILE, TNX); (in alto a destra) indicatori di precipitazione espressi in mm (RX1DAY, RX5DAY, PR95PRCTILE, PR99PRCTILE, TR100PR, PRCPTOT); (in basso a sinistra) indicatori di temperatura e di precipitazione espressi in numeri di giorni o numero di occorrenze (R20, CDD, ID, WSDI, HW, TR). Per ciascun indicatore, il simbolo indica la media spaziale mentre, per i modelli EURO-CORDEX; la barra denota la variabilità inter-modello calcolata in termini di deviazione standard.*

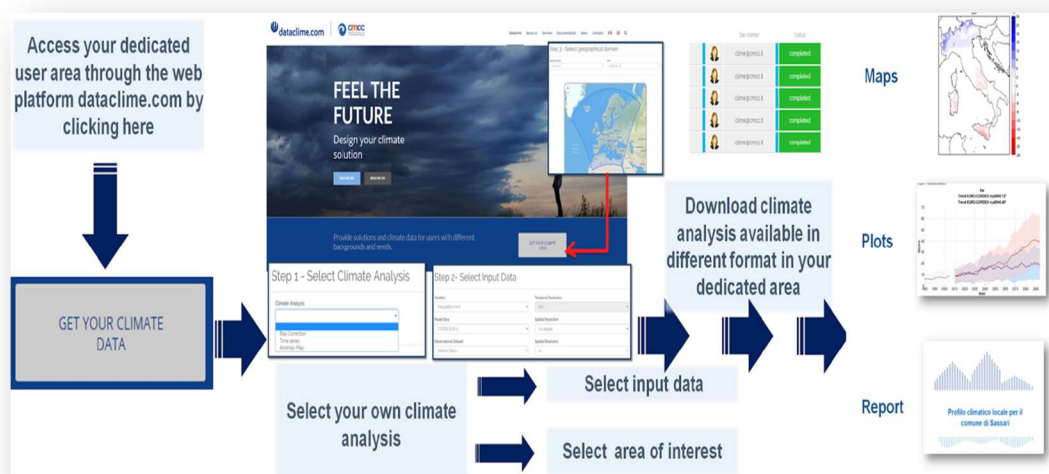
Il suddetto confronto tra indicatori mostra che:

- Per quanto riguarda le variazioni degli indicatori di temperatura in °C, VHR-PRO\_IT restituisce valori che ricadono nella variabilità inter-modello del sotto-insieme di modelli EURO-CORDEX esaminati ad eccezione della temperatura media (TG) per entrambi gli scenari RCP considerati.
- Per quanto riguarda le variazioni degli indicatori di precipitazione in mm, VHR-PRO\_IT restituisce valori che ricadono nella variabilità inter-modello del sotto-insieme di modelli EURO-CORDEX per la precipitazione annuale cumulata (PRCPTOT). Per gli altri indicatori, legati agli estremi di precipitazione, la maggiore risoluzione spaziale e l'esplicita modellazione dei processi convettivi tende ad estremizzare le variazioni.
- Per quanto riguarda le variazioni degli indicatori di temperatura e di precipitazione espressi come numero di giorni, VHR-PRO\_IT restituisce valori che ricadono nella variabilità inter-modello del sotto-insieme di modelli EURO-CORDEX esaminati.

## Allegato 3: Piattaforma DATACLIME

L'allegato fornisce una descrizione sintetica del prodotto web dedicato alla visualizzazione delle analisi climatiche elaborate dalla Fondazione CMCC per la regione Sardegna. I risultati sono resi disponibili mediante la piattaforma DATACLIME ([www.dataclime.com](http://www.dataclime.com)) sviluppata dalla Fondazione CMCC con l'utilizzo del prodotto web Visualizza dati climatici. Questo strumento permette la visualizzazione di mappe di scenari di una serie di indicatori climatici ampiamente consolidati in letteratura o definiti in precedenti attività di ricerca e di consulenza della Fondazione CMCC, considerando diversi trentenni, scenari climatici IPCC e modelli climatici regionali ad alta risoluzione.

DATACLIME è un servizio climatico sviluppato dalla Divisione Regional Models and geo-Hydrological Impacts Division (REMHI) della Fondazione CMCC, al fine di fornire soluzioni climatiche su misura per utenti con competenze ed esigenze differenti. I punti di forza del servizio DATACLIME possono essere riassunti come segue: (i) facile accesso a un'enorme quantità di dati climatici; (ii) personalizzazione dell'analisi climatica su diverse scale temporali e spaziali; (iii) disponibilità di diverse analisi statistiche; (iv) diversi formati idonei per ulteriori analisi su piattaforme diverse; e, infine, (v) materiale scientifico e di dettaglio per gli utenti. La maggior parte delle funzionalità del servizio sono progettate sulla base delle interazioni con gli utenti e le parti interessate (dagli amministratori comunali alle società di consulenza, aziende private e decisori politici). La **Figura A3** mostra il workflow del servizio climatico DATACLIME sviluppato da CMCC.



*Figura A3: Workflow della piattaforma DATACLIME*

Gli utenti possono accedere al servizio DATACLIME previa registrazione. Le credenziali sono strettamente personali e non è consentita alcuna divulgazione o cessione a terzi. Per registrarsi, occorre accedere alla pagina di registrazione <https://cmccwebremhi.it/register> e inserire le seguenti informazioni: progetto, nome, cognome, account di posta elettronica, username e password. Tra i campi da compilare in fase di registrazione, per il campo Project sarà necessario indicare: SRACC. Questo campo risulta necessario per essere "riconosciuti" dal sistema come utenti che possono visualizzare e scaricare le analisi elaborate dalla Fondazione CMCC nell'ambito della commessa

SRACC. Conclusa la fase di registrazione, gli utenti verranno successivamente abilitati come utenti "SRACC" nella piattaforma DATACLIME e avvisati tramite una mail di notifica con oggetto "Your account is enabled". Le persone da abilitare saranno comunicate dal referente del progetto.

Per accedere al prodotto "Visualizza dati climatici", occorre:

1. Eseguire il login tramite <https://cmccwebremhi.it/login> indicando le credenziali personali
2. Cliccare su "Select a climate service/Seleziona un servizio climatico" e dalla sezione "Select climate analysis/Seleziona un'analisi climatica" scegliere come opzione "Visualize climate data/Visualizza dati climatici".

In **Figura A4** viene mostrata l'interfaccia web del prodotto. Visualizza dati climatici.

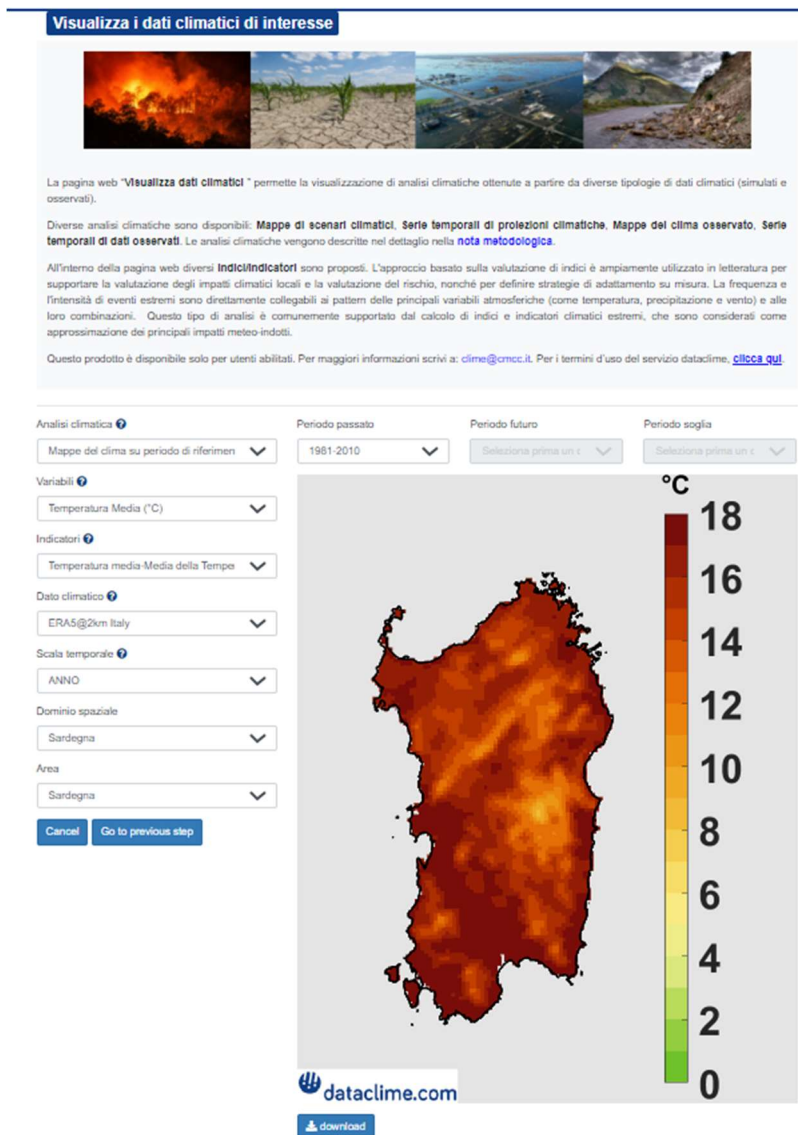


Figura A4: Interfaccia web del prodotto Visualizza dati climatici.

---

## Glossario

**Anomalia/variazione climatica:** È la comparazione matematica (usualmente espressa in termini di differenza per la temperatura, e di rapporto per la precipitazione) tra una caratteristica statistica di interesse di una variabile fisica valutata nell'orizzonte futuro rispetto al periodo di riferimento. Tale comparazione prescinde, per definizione, da quanto simile alle osservazioni sia la grandezza di interesse fornita dal modello nel periodo di riferimento, e può quindi essere ritenuta una informazione particolarmente robusta. Inoltre, il calcolo delle anomalie climatiche non richiede l'applicazione di tecniche di *bias correction*.

**Antropogenico:** Causato dagli esseri umani.

**Cambiamento climatico:** con il termine cambiamento climatico ci si riferisce a un cambiamento dello stato del clima che persiste per un periodo di tempo prolungato (solitamente di decenni o più), e identificabile (per esempio, attraverso l'uso di test statistici) da cambiamenti della media e/o della variabilità delle sue proprietà. Il cambiamento climatico può essere dovuto a processi naturali interni, o a forzanti esterni, come le modulazioni dei cicli solari, le eruzioni vulcaniche, e i ripetuti cambiamenti antropogenici della composizione dell'atmosfera o dell'uso del suolo. Si noti che la Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change), nel suo articolo 1, definisce il cambiamento climatico come: "un cambiamento del clima, attribuibile direttamente o indirettamente all'attività umana, che altera la composizione dell'atmosfera globale e che si somma alla variabilità climatica naturale osservata nel corso di periodi di tempo confrontabili". Pertanto, l'UNFCCC fa una distinzione tra il cambiamento climatico imputabile alle attività umane che alterano la composizione dell'atmosfera, e la variabilità climatica attribuibile a cause naturali.

**Ciclo stagionale:** media mensile, sul trentennio considerato, della variabile di interesse. Denominato anche ciclo annuale.

**Clima:** Il clima in senso stretto è solitamente definito come il tempo meteorologico medio o, in maniera più rigorosa, come la descrizione statistica in termini di media e variabilità di grandezze rilevanti, nel corso di un periodo di tempo che va da mesi a migliaia o milioni di anni. Il periodo classico per calcolare la media di queste variabili è trent'anni, secondo la definizione dell'Organizzazione meteorologica mondiale (WMO - World Meteorological Organization). Le grandezze rilevanti sono nella maggior parte dei casi variabili superficiali, come temperatura, precipitazioni e venti. In senso più ampio e generale, il clima è lo stato, con l'inclusione di una descrizione statistica, del sistema climatico.

**Estremi climatici:** Il verificarsi del valore di una variabile atmosferica al di sopra (o sotto) di un valore di soglia vicino all'estremità superiore (o inferiore) della gamma di valori osservati della variabile. Sono intesi come sinonimi eventi estremi, eventi meteorologici estremi.

**Impatti (conseguenze, esiti):** gli effetti sui sistemi naturali e umani. Nel Rapporto WGII AR5 dell'IPCC, il termine impatti è usato principalmente per riferirsi agli effetti degli eventi meteorologici e climatici estremi e dei cambiamenti climatici, sui sistemi naturali e umani. Gli impatti generalmente si riferiscono agli effetti su persone, abitazioni, salute, ecosistemi, beni e risorse

---

economiche, sociali e culturali, servizi (inclusi quelli ambientali) e infrastrutture dovuti all'interazione dei cambiamenti climatici o degli eventi climatici pericolosi che si presentano entro uno specifico periodo di tempo, e alla vulnerabilità di una società o di un sistema esposti ai cambiamenti climatici stessi. Ci si riferisce inoltre agli impatti come a conseguenze ed esiti. Gli impatti dei cambiamenti climatici sui sistemi geofisici, compresi alluvioni, siccità e innalzamento del livello del mare, rappresentano un sottoinsieme di impatti denominati impatti fisici.

**Indicatore climatico:** È l'espressione matematica della grandezza ovvero della variabile climatica di interesse. Il framework ETCCDI (*Expert Team on Climate Change Detection and Indices*, [http://etccdi.pacificclimate.org/list\\_27\\_indices.shtml](http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml)) identifica una serie di indicatori climatici di particolare interesse rappresentativi di un vasto ventaglio di impatti. Naturalmente, indicatori sempre nuovi possono essere definiti per descrivere specifiche problematiche o impatti. Gli indicatori climatici sono spesso utilizzati per effettuare valutazioni di anomalie, in modo da descrivere, in maniera efficace e sintetica, i pericoli principali di aree anche vaste. In altre parole, gli indicatori climatici possono essere considerati utili *proxy* di un particolare impatto.

**Livello medio dei mari:** Il livello della superficie degli oceani in uno specifico punto, mediato su un periodo di tempo prolungato, come un mese o un anno. Il livello medio del mare è spesso utilizzato come datum nazionale cui sono riferite le altezze terrestri.

**Modello climatico:** Per modello climatico si intende, in generale, uno strumento che consenta di avere informazioni circa le principali variabili fisiche che regolano i processi atmosferici e l'interazione suolo-atmosfera. Più correttamente, gli standard attuali della comunità climatica fanno riferimento alla cosiddetta "catena di simulazione climatica" (*Climate Simulation Chain, CSC*), che è articolata nei seguenti step:

1. Scelta dello scenario RCP di riferimento;
2. Simulazione alla scala globale che considera lo scenario RCP come condizione iniziale e al contorno. Tale simulazione può essere fatta attraverso i *Global Climate Models* (GCM), costituiti da un sistema di equazioni che descrivono le principali dinamiche atmosferiche e oceaniche, oppure mediante i più sofisticati *Earth System Models* (ESM), che includono la modellazione dei più rilevanti processi fisici, chimici e biologici. In entrambi i casi, tali simulazioni forniscono risultati con una copertura globale e, conseguentemente, una risoluzione orizzontale bassa, dell'ordine dei 50-80 km. Risoluzioni più spinte sono usualmente più difficili da ottenere a causa delle notevoli risorse computazionali necessarie per processare e archiviare le informazioni.
3. *Downscaling* della simulazione globale. Il *downscaling* può essere statistico oppure dinamico. Il secondo caso, più frequente, consta di un modello climatico regionale (*Regional Climate Model, RCM*), che risolve i processi fisici e atmosferici che occorrono a scale spazio-temporali più risolte. Gli RCM vengono eseguiti utilizzando i risultati della simulazione globale come condizione al contorno, e forniscono risultati su domini più ristretti (ma comunque transnazionali) con una risoluzione orizzontale dell'ordine di "qualche" km. Ad esempio, per l'Italia sono disponibili simulazioni con risoluzione di circa 12, circa 8 e circa 2 km. Per maggiori approfondimenti si veda la voce "proiezioni climatiche".

---

**Percentile:** All'interno di un campione statistico formato da realizzazioni di una variabile casuale, il percentile corrispondente a un livello di probabilità pari a X% è il valore al di sotto del quale si trova il X% degli elementi del campione (compreso il valore stesso). Il percentile è spesso utilizzato per stimare gli estremi della distribuzione. Ad esempio, il 90-simo (10-mo) percentile può essere utilizzato come riferimento per la soglia dei valori più alti (bassi).

**Pericolo e rischio climatico:** Per "pericolo" si intende la quantificazione del fenomeno fisico dal quale ci si vuole cautelare, riferito ad una data area geografica e una data finestra temporale. In relazione al cambiamento climatico, la definizione è ristretta alle variabili climatiche "sorgente", quali ad esempio temperatura e precipitazione. Con riferimento al settore delle risorse idriche, un possibile pericolo climatico è rappresentato dalla variazione dei volumi stagionali di precipitazione su di un'area di ricarica di falda, i cui possibili impatti sono la diminuzione dei volumi idrici prelevabili dalla sorgente, l'abbassamento del livello di falda e/o l'intrusione del cuneo salino, a seconda delle caratteristiche locali. Tali impatti hanno conseguenze in cascata, ad esempio, sul fabbisogno irriguo e la possibilità di soddisfarlo, nonché sulla competizione con gli usi idropotabili. Per "rischio" si intende invece il danno atteso (in termini economici oppure quantificato da una variabile di interesse), in una data area geografica e una data finestra temporale, per effetto del fenomeno fisico di interesse. Il rischio climatico si sprigiona quindi da un pericolo climatico: esso potrebbe rappresentare l'inasprimento di un rischio già esistente oppure l'innescarsi di un nuovo rischio. Il framework dell'IPCC vede il rischio (in generale, e quello climatico in particolare) come prodotto di pericolo, vulnerabilità ed esposizione. L'esposizione rappresenta l'asset fisico (infrastrutture, costruzioni, persone, attività economiche, punti di interesse) che potrebbe essere danneggiato dal pericolo, ovvero dal fenomeno fisico. La vulnerabilità rappresenta invece la propensione dell'asset ad essere danneggiato.

**Periodo di riferimento:** L'arco temporale descrittivo del clima corrente rispetto al quale si vogliono analizzare gli eventuali cambiamenti nelle caratteristiche climatiche di un orizzonte temporale futuro. Per la sua selezione, bisogna considerare almeno due esigenze: da un lato, la sua ampiezza deve essere sufficientemente, ma non eccessivamente, estesa, in modo da ritenere, all'interno del periodo, il clima omogeneo e valutabile in modo robusto; dall'altro, si deve trattare di un arco temporale all'interno del quale siano disponibili dati sufficienti (in termini di copertura e risoluzione spaziale e temporale) per le variabili fisiche che si intende analizzare, come ad esempio precipitazione e temperatura.

**Proiezione climatica:** Si tratta dei risultati delle simulazioni effettuate a mezzo di modelli climatici. Solitamente, si fa riferimento alle "proiezioni" per sottolineare i risultati riguardanti un orizzonte temporale futuro; tuttavia, le simulazioni climatiche coprono un arco temporale più vasto, che comprende il periodo di riferimento, per il quale si abbiano osservazioni delle variabili fisiche modellate. Ciò allo scopo sia di inizializzare correttamente il modello, sia di costituire un riferimento rispetto al quale valutare un eventuale cambiamento. È bene ricordare in questa sede che le proiezioni, anche se caratterizzate da una risoluzione temporale giornaliera (o in alcuni casi oraria) si distinguono dalle "previsioni" poiché non possono essere considerate utili in una prospettiva *day-by-day*. In altre parole, le proiezioni non forniscono informazioni circa il valore che una variabile

---

assumerà in una specifica data, ma è più corretto invece valutare la distribuzione statistica e le sue proprietà (media, varianza, etc.).

**Scenario climatico:** la rappresentazione plausibile e spesso semplificata del clima futuro, basata su un insieme internamente coerente di relazioni climatologiche, costruita per un suo uso esplicito nell'indagine delle potenziali conseguenze del cambiamento climatico antropogenico, e che serve spesso come input ai modelli sugli impatti. Le proiezioni climatiche spesso servono da materiale grezzo per costruire scenari climatici, ma gli scenari climatici di solito richiedono ulteriori informazioni, come per esempio sul clima attuale osservato.

**Scenario di concentrazione:** Secondo il 5° Rapporto IPCC, un parametro fisico che ben descrive la presenza di attività antropiche è la concentrazione di gas clima-alteranti (GHG) in atmosfera. Per prevedere come si evolverà il clima nel prossimo futuro, si richiede la contestuale previsione dell'evoluzione della concentrazione di GHG in atmosfera, la quale dipende, a sua volta, da molteplici fattori economici e sociali, quali la crescita della popolazione, lo sviluppo tecnologico e industriale, la tipologia di combustibili utilizzati, e simili. Data la complessità inerente tali valutazioni, la letteratura fornisce solo delle possibili ipotesi, definite appunto "scenari climatici". Il 5° Rapporto IPCC seleziona, ritenendoli di particolare interesse, un numero ristretto di tali scenari, i cosiddetti *Representative Concentration Pathways* (RCP). Tali scenari fattivamente sono costituiti da serie temporali di emissioni e concentrazioni di tutti i gas clima-alteranti, gli aerosol e i gas chimicamente attivi, nonché i cambiamenti attesi di suolo e relative coperture (*land use land cover*, LULC), che portano, all'anno 2100, ad uno specifico valore di *forcing* radiativo, cioè di cambiamento nel flusso radiativo nella parte più esterna dell'atmosfera. L'attributo "*representative*" sta ad indicare che un RCP è soltanto una singola realizzazione tra i molteplici possibili percorsi che possono portare allo stesso valore di *forcing*. L'attributo "*pathway*" ricorda invece che ad essere determinante, per l'evoluzione del clima, non è soltanto il valore finale di *forcing* ma anche la traiettoria con cui lo si raggiunge. Il 5° Rapporto IPCC identifica quattro RCP significativi (Figura 1), ciascuno caratterizzato da un andamento coerente con l'implementazione, o la non implementazione, di politiche di mitigazione ovvero di riduzione delle emissioni, corrispondenti all'adempimento, o meno, degli accordi internazionali (in particolare il *Paris agreement*, stipulato nel 2015):

- RCP 2.6. Tale scenario prevede il raggiungimento di un *forcing* radiativo pari a +2.6 W/mq entro il 2100 rispetto ai livelli preindustriali. La traiettoria è caratterizzata dalla presenza di un picco di concentrazione (corrispondente a un forcing di circa +3 W/mq) intorno al 2050 e poi una stabile diminuzione, determinata dal perseguimento di una massiccia strategia di mitigazione.
- RCP 4.5. Tale scenario prevede il raggiungimento di un *forcing* radiativo pari a +4.5 W/mq entro il 2100, rispetto ai livelli preindustriali, in modo pressoché asintotico, e scaturisce dall'ipotesi di implementazione di politiche di mitigazione efficaci, ma non tanto quanto accade per RCP 2.6.
- RCP 6.0. Tale scenario prevede il raggiungimento di un *forcing* radiativo pari a +6.0 W/mq entro il 2100 rispetto ai livelli preindustriali, valore che tuttavia è destinato ad incrementare



---

ulteriormente oltre il 2100. Rispetto allo scenario RCP 4.5, RCP 6.0 prevede politiche di mitigazione ancora più blande.

- RCP 8.5. Tale scenario prevede il raggiungimento di un *forcing* radiativo pari a +8.5 W/mq entro il 2100 rispetto ai livelli preindustriali, destinato ad incrementarsi ulteriormente nei secoli successivi. Tale scenario è definito *worst case* poiché corrispondente all'ipotesi di sviluppo economico, tecnologico e sociale basato interamente sull'utilizzo di combustibili fossili non rinnovabili.

**Temperatura superficiale media globale:** una stima della temperatura superficiale media globale dell'aria. Tuttavia, per variazioni nel corso del tempo, si utilizzano solo le anomalie, come le deviazioni da una climatologia, più comunemente basate sulla media globale pesata sull'area dell'anomalia di temperatura superficiale del mare, e dell'anomalia della temperatura dell'aria sulla superficie terrestre.

**Variabilità climatica:** con il termine variabilità climatica ci si riferisce alle variazioni dello stato medio e di altre statistiche (come la deviazione standard, l'occorrenza di eventi estremi, etc.) del clima a tutte le scale spaziali e temporali oltre a quella dei singoli eventi meteorologici. La variabilità può essere dovuta a processi interni naturali, all'interno del sistema climatico (variabilità interna), o a variazioni del forzante esterno naturale o antropogenico (variabilità esterna).