



Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici

PNACC

ALLEGATO TECNICO-SCIENTIFICO

ANALISI DELLA CONDIZIONE CLIMATICA ATTUALE E FUTURA

Versione luglio 2017

ANALISI DELLA CONDIZIONE CLIMATICA ATTUALE E FUTURA.....	7
Aree Terrestri.....	7
Aree Marine/Costiere	40
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	66

Indice delle Figure

Figura 1: Mappe degli indicatori (E-OBS 1981-2010).....	9
Figura 2: Distribuzioni di frequenza degli indicatori (E-OBS 1981-2010).....	10
Figura 3: Zonazione climatica sul periodo climatico di riferimento (1981-2010).....	12
Figura 4: Distribuzione di frequenza degli indicatori per ogni macroregione (zonazione climatica di riferimento).....	13
Figura 5: Proiezioni climatiche stagionali di anomalia delle temperatura medie e delle precipitazioni cumulate medie per il periodo 2021-2050, rispetto al periodo di riferimento 1981-2010, per gli scenari RCP4.5 ed RCP8.5.	17
Figura 6: Proiezioni climatiche stagionali di anomalia delle temperatura media e delle precipitazioni cumulate medie per il periodo 2071-2100, rispetto al periodo di riferimento 1981-2010, per gli scenari RCP4.5 ed RCP8.5.	18
Figura 7: Mappe delle anomalie (COSMO RCP4.5 2021-2050 vs 1981-2010).....	20
Figura 8: Mappe delle anomalie (COSMO RCP8.5 2021-2050 vs 1981-2010).....	21
Figura 9: Distribuzioni di frequenza delle anomalie (COSMO RCP4.5 2021-2050 vs 1981-2010).....	22
Figura 10: Distribuzioni di frequenza delle anomalie (COSMO RCP8.5 2021-2050 vs 1981-2010).....	22
Figura 11: Scenario RCP4.5: (a) Mappa dei cluster individuati, (b) Distribuzioni di frequenza delle anomalie all'interno dei cluster individuati.	23
Figura 12: Scenario RCP8.5: (a) Mappa dei cluster individuati, (b) Distribuzioni di frequenza delle anomalie all'interno dei cluster individuati.	25
Figura 13: Valori medi delle anomalie all'interno dei cluster (COSMO RCP4.5 2021-2050 vs 1981-2010).	27
Figura 14: Valori medi delle anomalie all'interno dei cluster (COSMO RCP8.5 2021-2050 vs 1981-2010).	27
Figura 15: Zonazione climatica delle anomalie (2021-2050 vs 1981-2010, scenario RCP4.5) per ciascuna delle sei macroregioni. Per agevolare la lettura sono state riportate anche le informazioni relative alla zonazione di riferimento (1981-2010) e al quadro complessivo dei cluster delle anomalie.....	30
Figura 16: Zonazione climatica delle anomalie (2021-2050 vs 1981-2010, scenario RCP8.5) per ciascuna delle sei macroregioni. Per agevolare la lettura sono state riportate anche le informazioni relative alla zonazione di riferimento (1981-2010) e al quadro complessivo dei cluster delle anomalie.....	32
Figura 17: (a) Indice di Silhouette, (b) Indice di Calinski-Harabasz, (c) Indice di Davies-Bouldin.....	35
Figura 18: Rappresentazione schematica dell'approccio utilizzato nel downscaling dinamico. (Immagine tratta da (Giorgi, 2008).)	36
Figura 19: (a) Indice di Silhouette, (b) Indice di Calinski-Harabasz, (c) Indice di Davies-Bouldin, rispettivamente per scenario RCP 4.5 (sinistra) e scenario RCP 8.5 (destra).	39
Figura 20: Climatologie (pannelli superiori) e distribuzioni di frequenza (pannelli inferiori) degli indicatori SST e SSH sul Mediterraneo centrale (REAN 1987-2010).	42
Figura 21: Mappe mensili dell'indicatore di rimescolamento proposto in Fratianni et al. 2016. Il dataset considerato è REAN rilasciato da CMEMS; le analisi sono state eseguite su medie mensili per il periodo 1987-2010.....	43
Figura 22: Differenza della temperatura superficiale (°C) media calcolata sul periodo 1987-2010 tra la rianalisi (REAN) e il modello forzato con i dati climatici (MEDSEA).	45

Figura 23: Climatologia mensile della temperatura superficiale dell'acqua (°C) calcolata sul periodo 1987-2010 per la rianalisi (REAN, linea continua) ed per la simulazione con il modello forzato (MEDSEA, linea tratteggiata).	45
Figura 24: Differenza del livello del mare (metri) medio calcolata sul periodo 1987-2010 tra la rianalisi (REAN) e il modello forzato con i dati climatici (MEDSEA). I dati sono stati corretti rimuovendo il valore medio calcolato sull'intero periodo di ciascun dataset.....	45
Figura 25: Climatologia mensile del livello del mare (metri) calcolata sul periodo 1987-2010 per la rianalisi (REAN, linea continua) e per la simulazione con il modello forzato (MEDSEA, linea tratteggiata). I dati sono stati corretti rimuovendo il valore medio calcolato sull'intero periodo di ciascun dataset.....	46
Figura 26: Mappe mensili dell'indicatore di rimescolamento proposto in (Fратиanni et al. 2016). Il dataset considerato è MEDSEA; le analisi sono state eseguite su medie mensili per il periodo 1987-2010.	47
Figura 27: REAN (box Mediterraneo centrale): (a) Indice di Silhouette, (b) Indice di Calinski-Harabasz, (c) Indice di Davies-Bouldin.....	47
Figura 28: Zonazione climatica marina sul periodo climatico di riferimento (REAN 1987-2010) considerando un box sul Mediterraneo centrale.	49
Figura 29: Differenza della temperatura superficiale (°C) media tra il periodo 2021-2050 (scenario RCP8.5) e 1981-2010 calcolata su base stagionale. I pannelli dall'alto al basso rappresentano la sequenza stagionale: DJF, MAM, JJA, SON.	51
Figura 30: Differenza del livello del mare (metri) tra il periodo 2021-2050 (scenario RCP8.5) e 1981-2010 calcolata su base stagionale. I pannelli dall'alto al basso rappresentano la sequenza stagionale: DJF, MAM, JJA, SON.	52
Figura 31: Mappe mensili dell'indicatore di rimescolamento proposto in Fratianni et al. 2016. Il dataset considerato è MEDSEA; le analisi sono state eseguite su medie mensili disponibili per il periodo 2021-2050.	53
Figura 32: Differenza del valore medio di pH (scala totale) alla superficie del mare tra il periodo 2041-2050 (scenario RCP8.5) e 2001-2010 calcolati su base stagionale. I pannelli dall'alto al basso rappresentano la sequenza stagionale: DJF, MAM, JJA, SON.	54
Figura 33: Divisione dei mari italiani in specifiche regioni marine proposta in (Fratianni et al. 2016). La zona ombreggiata indica il limite di 12 miglia dalla linea di costa. Le regioni marine sono identificate tramite i seguenti acronimi: NADR: Adriatico settentrionale, CADR: Adriatico Centrale, SADR: Adriatico meridionale, IONS: Mar Ionio e Mediterraneo centrale, LIGS: Mar Ligure, TYRS: Mar Tirreno, WMED: Mar Mediterraneo Occidentale, CMED: Mar Mediterraneo centrale.	55
Figura 34: Confronto delle climatologie mensili di temperatura superficiale dell'acqua (sst, °C) tra il 1981-2010 (linea continua) e lo scenario RCP8.5 nel periodo 2021-2050 (linea tratteggiata) per la fascia costiera entro le 12 miglia marine delle regioni marine definite nella Figura 33 .Il valore δ sst rappresenta la differenza calcolata su base annuale tra i due periodi.	57
Figura 35: Confronto delle climatologie mensili del livello del mare (ssh, m) tra il 1981-2010 (linea continua) e lo scenario RCP8.5 nel periodo 2021-2050 (linea tratteggiata) per la fascia costiera entro le 12 miglia marine delle regioni marine definite nella Figura 33. Il valore δ ssh rappresenta la differenza calcolata su base annuale tra i due periodi.	58
Figura 36: Confronto delle climatologie mensili dell'indicatore di rimescolamento (mixing - imx) tra il 1981-2010 (linea continua) e lo scenario RCP8.5 nel periodo 2021-2050 (linea tratteggiata) per la fascia costiera entro le 12 miglia marine delle regioni marine definite nella Figura 33 . Il valore δ imx rappresenta la differenza calcolata su base annuale tra i due periodi.	59

Figura 37: Confronto delle climatologie mensili del pH (scala totale) alla superficie del mare tra il 2001-2010 (linea continua) e lo scenario RCP8.5 nel periodo 2041-2050 (linea tratteggiata) per la fascia costiera entro le 12 miglia marine delle regioni marine definite Figura 33. Il valore δpH rappresenta la differenza calcolata su base annuale tra i due periodi.....	60
Figura 38: Climatologie degli indicatori SSTA e SSHA (pannelli superiori) e relative distribuzioni di frequenza (pannelli inferiori) sul Mediterraneo centrale ottenute dal dataset MEDSEA RCP8.5 per il periodo 2021-2050 vs 1981-2010).....	61
Figura 39: Metriche per l'identificazione del numero di cluster calcolate per il dataset MEDSEA RCP8.5 (box Mediterraneo centrale): (a) Indice di Silhouette, (b) Indice di Calinski-Harabasz, (c) Indice di Davies-Bouldin.	62
Figura 40: Zonazione climatica delle anomalie di temperatura superficiale (SSTA) e livello del mare (SSHA) per il dataset MEDSEA RCP8.5 (2021-2050 vs 1981-2010) considerando un box sul Mediterraneo centrale.....	63
Figura 41: Zonazione climatica marina delle anomalie (2021-2050 vs 1981-2010, scenario RCP8.5) per le macroregioni climatiche 1M e 2M. Per agevolare la lettura sono state riportate anche le informazioni relative alla zonazione di riferimento (1987-2010) e al quadro complessivo dei cluster delle anomalie.....	64

Indice delle Tabelle

Tabella 1: Indicatori considerati.....	7
Tabella 2: Valori medi e deviazione standard degli indicatori per ciascuna macroregione individuata....	14
Tabella 3: Valori medi dei cluster individuati (COSMO RCP4.5 2021-2050 vs 1981-2010).....	24
Tabella 4: Valori medi dei cluster individuati (COSMO RCP8.5 2021-2050 vs 1981-2010).....	25
Tabella 5: Descrizione delle aree climatiche omogenee per macroregione (COSMO RCP4.5).....	30
Tabella 6: Descrizione delle aree climatiche omogenee per macroregione (COSMO RCP8.5).....	32
Tabella 7: Matrice di correlazione delle anomalie (COSMO RCP4.5 2021-2050 vs 1981-2010).....	38
Tabella 8: matrice di correlazione delle anomalie (COSMO RCP8.5 2021-2050 vs 1981-2010).....	38
Tabella 9: Descrizione delle anomalie climatiche per le macroregioni climatiche 1M e 2M.....	65

ELENCO AUTORI (IN ORDINE ALFABETICO)

Coordinamento scientifico-gestionale

Giulia Galluccio e Valentina Mereu

Il supporto scientifico-editoriale è stato assicurato da

Valentina Bacciu, Francesco Bosello, Serena Marras, Paola Mercogliano, Jaroslav Mysiak, Antonio Navarra, Valentina Vinci

Elenco esperti per argomento

Analisi della condizione climatica attuale e futura

Aree terrestri

Giuliana Barbato (CMCC), **Paola Mercogliano** (CMCC, CIRA), Guido Rianna (CMCC), Alessandra Zollo (CMCC)

Aree marine/costiere

Giuliana Barbato (CMCC), **Giovanni Coppini** (CMCC), Rita Lecci (CMCC), Tomas Lovato (CMCC), Paola Mercogliano (CMCC, CIRA), **Simona Masina** (CMCC)

Si ringraziano per le osservazioni e i contributi alla revisione del documento:

- Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, Direzione Generale per la Protezione della Natura e del Mare
- Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, Direzione Generale per la Salvaguardia del Territorio e delle Acque
- Ministero dei beni e delle attività culturali e del turismo, Direzione Generale Arte e Architettura Contemporanee e Periferie Urbane
- Ministero della Salute, Direzione Generale per l'Igiene e la sicurezza degli alimenti e la nutrizione
- Ministero della Salute, Direzione Generale della prevenzione sanitaria
- Presidenza del Consiglio dei Ministri, Dipartimento della Protezione Civile
- Tavolo Interregionale sui Cambiamenti Climatici, costituito all'interno della Commissione Ambiente ed Energia del Comitato delle Regioni e delle Province Autonome, in particolare: le regioni Emilia-Romagna, Lombardia, Molise, Piemonte, Puglia, Sardegna, Toscana e le Province Autonome di Bolzano e Trento
- Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile (ENEA)
- Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (SNPA)
- Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), Istituto di Biometeorologia (IBIMET) e Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima (ISAC)

ANALISI DELLA CONDIZIONE CLIMATICA ATTUALE E FUTURA

AREE TERRESTRI

La presente sezione si propone di individuare, tramite la tecnica statistica della *cluster analysis*, porzioni del territorio nazionale che potrebbero essere esposte a variazioni climatiche simili rapportandole ad una condizione climatica presente. Tali porzioni saranno chiamate aree climatiche omogenee nazionali terrestri.

Il metodo proposto si è sviluppato attraverso i seguenti passaggi metodologici:

- Individuazione di sei “**macroregioni climatiche omogenee**” per cui i dati osservati utilizzati riportano condizioni climatiche simili negli ultimi trent'anni (1981-2010) (zonazione climatica) attraverso la metodologia della *cluster analysis* applicata ad un set di indicatori climatici (individuato seguendo Schmidt-Thomé and Greiving 2013) utilizzando il dataset E-OBS (Haylock et al. 2008);
- Analisi delle anomalie climatiche attese per il XXI secolo in termini di proiezioni di temperature e precipitazioni medie stagionali, considerando due trentenni (2021-2050 e 2071-2100) e due diversi scenari climatici RCP (*Representative Concentration Pathway* 4.5 e 8.5, IPCC 2013a) a partire dai dati simulati dal modello climatico regionale COSMO-CLM;
- Zonazione delle anomalie climatiche sulla base delle variazioni climatiche attese per il periodo 2021-2050 (RCP 4.5 e RCP 8.5) per gli indicatori selezionati;
- Individuazione di “**aree climatiche omogenee**”, attraverso la sovrapposizione delle macroregioni climatiche omogenee e della zonazione delle anomalie, per definire aree con uguale condizione climatica attuale e stessa proiezione climatica di anomalia futura.

L'individuazione delle “macroregioni climatiche omogenee”, proposta nella PNACC, rappresenta la base per lo studio delle anomalie climatiche future e la definizione delle “aree climatiche omogenee” nazionali¹.

Il set di indicatori climatici su cui si basa l'analisi (Tabella 1) è stato individuato nell'ESPON CLIMATE project (Schmidt-Thomé and Greiving, 2013) e include indicatori che rappresentano (in qualità di *proxy*) i principali impatti meteo-indotti, a scala europea, su ambiente naturale, costruito, patrimonio culturale, sfera sociale ed economica (si veda a tal proposito la Tabella 2.2 in Schmidt-Thomé and Greiving, 2013).

Tabella 1: Indicatori considerati.

Indicatore	Abbreviazione	Descrizione	Unità di misura
Temperatura media annuale	Tmean	Media annuale della temperatura media giornaliera	(°C)
Giorni di precipitazione intense	R20	Media annuale del numero di giorni con precipitazione giornaliera superiore ai 20 mm	(giorni/anno)

¹ In generale, per quanto attiene le conoscenze attuali relative allo stato e alle variazioni del clima in Italia si faccia riferimento al Capitolo 1 del “Rapporto sullo stato delle conoscenze scientifiche su impatti, vulnerabilità ed adattamento ai cambiamenti climatici in Italia” (MATTM 2014) e alla documentazione consultabile al sito ufficiale dell'ISPRA, aggiornata annualmente.

DRAFT

Frost days	FD	Media annuale del numero di giorni con temperatura minima al di sotto dei 0°C	(giorni/anno)
Summer days	SU95p	Media annuale del numero di giorni con temperatura massima maggiore di 29.2 °C (valore medio del 95° percentile della distribuzione delle temperature massime osservate tramite E-OBS)	(giorni/anno)
Cumulata delle precipitazioni invernali	WP	Cumulata delle precipitazioni nei mesi invernali (Dicembre, Gennaio, Febbraio)	(mm)
Cumulata delle precipitazioni estive	SP	Cumulata delle precipitazioni nei mesi estivi (Giugno, Luglio, Agosto)	(mm)
Copertura nevosa	SC	Media annuale del numero di giorni per cui l'ammontare di neve superficiale è maggiore di un 1 cm	(giorni/anno)
Evaporazione	Evap	Evaporazione cumulata annuale	(mm/anno)
Consecutive dry days	CDD	Media annuale del massimo numero di giorni consecutivi con pioggia inferiore a 1 mm/giorno	(giorni/anno)
95° percentile della precipitazione	R95p	95° percentile della precipitazione	(mm)

In questo lavoro, sono state applicate alcune modifiche agli indicatori selezionati all'interno del lavoro europeo di Schmidt-Thomé and Greiving (2013) per tener conto delle specificità del territorio italiano. Tali modifiche sono riportate di seguito²:

- la soglia per la definizione dell'indicatore *summer days* è incrementata dal valore di 25°C a 29.2°C, pari al 95° percentile medio della distribuzione delle temperature massime calcolate tramite il set di dati osservati E-OBS (Haylock et al. 2008) per il periodo 1981-2010;
- In aggiunta all'indicatore *R20*, che restituisce una misura della frequenza delle precipitazioni intense (>20mm/giorno), si è considerato il 95° percentile della distribuzione delle precipitazioni giornaliere (R95p) come stima di "magnitudo" degli eventi.
- Si è aggiunto l'indicatore CDD, che rappresenta il numero massimo di giorni consecutivi all'anno con assenza di pioggia (<1 mm/giorno).

L'analisi, per completezza, si è estesa a considerare altri indicatori che potevano essere significativi nel periodo di riferimento 1981-2010. In particolare, sono anche stati considerati i seguenti indicatori: temperature medie stagionali, numero di giorni con temperatura minima maggiore di 20°C, precipitazione totale annuale e numero di giorni di precipitazione annuale. Poiché parte di tali indicatori sono correlati con gli indicatori già selezionati sono quindi stati esclusi dall'analisi per evitare un risultato sbilanciato in quanto maggiormente influenzato dalle stesse variabili (Mooi and Sarstedt 2011). Si è inoltre osservato che l'aggiunta di indicatori meno correlati (comunque superiore a 0.7) non ha comportato invece nessuna sensibile variazione dei cluster individuati. Anche questi, nello specifico il numero di giorni con Tmin maggiore di 20°C e il numero di giorni di precipitazione annuale, non sono stati inclusi tra quelli finali selezionati.

ZONAZIONE CLIMATICA SUL PERIODO DI RIFERIMENTO 1981-2010

La *cluster analysis* della condizione climatica attuale per il periodo di riferimento 1981-2010 è stata effettuata a partire dal dataset E-OBS (Haylock et al. 2008)³. Il dataset E-OBS, seppur con alcuni limiti nel rappresentare le caratteristiche del clima locale, soprattutto in termini di estremi, è l'unico dataset su grigliato regolare con passo giornaliero attualmente disponibile sull'intero territorio nazionale. Tale caratteristica risulta essenziale in quanto l'utilizzo di un dataset non grigliato, per la procedura di *cluster*

² Per la definizione generale degli indicatori si faccia riferimento a (Karl et al. 1999) (Peterson 2001)

³ Il dataset E-OBS viene comunemente utilizzato in studi scientifici (Kotlarski et al. 2014; Drobinski et al. 2016; Wagner et al. 2017).

DRAFT

analysis selezionata in tale lavoro, non permetterebbe di ricoprire in maniera omogenea e con continuità tutto il territorio nazionale compromettendone l'applicazione. Va comunque sottolineato che la futura inclusione di ulteriori dati su grigliato regolare nella procedura di *cluster analysis* adottata permetterebbe una miglior caratterizzazione del clima, specie su scala locale.

Il dataset E-OBS fornisce dati di precipitazione e temperatura a risoluzione giornaliera su un grigliato regolare con risoluzione orizzontale $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (Haylock et al. 2008). Nello specifico è stata utilizzata la versione 13, ultima versione disponibile al momento dello svolgimento dell'attività⁴ sul periodo 1981-2010.

Le mappe degli indicatori climatici calcolate per il territorio nazionale, per il periodo di riferimento, vengono riportate in Figura 1. Come si può verificare, per la zonazione climatica sul periodo di riferimento sono utilizzati solo otto dei dieci indicatori definiti nella Tabella 1, in quanto *la copertura nevosa* e *l'evaporazione* non sono forniti da tale *dataset*. Dunque, per l'analisi della condizione climatica attuale sono stati selezionati 8 indicatori, nello specifico Tmean, R20, FD, SU95p, WP, SP, R95p, CDD.

La Figura 2 mostra la buona variabilità di tutti gli indicatori selezionati sul territorio nazionale e per ogni indicatore quali siano i valori più frequenti.

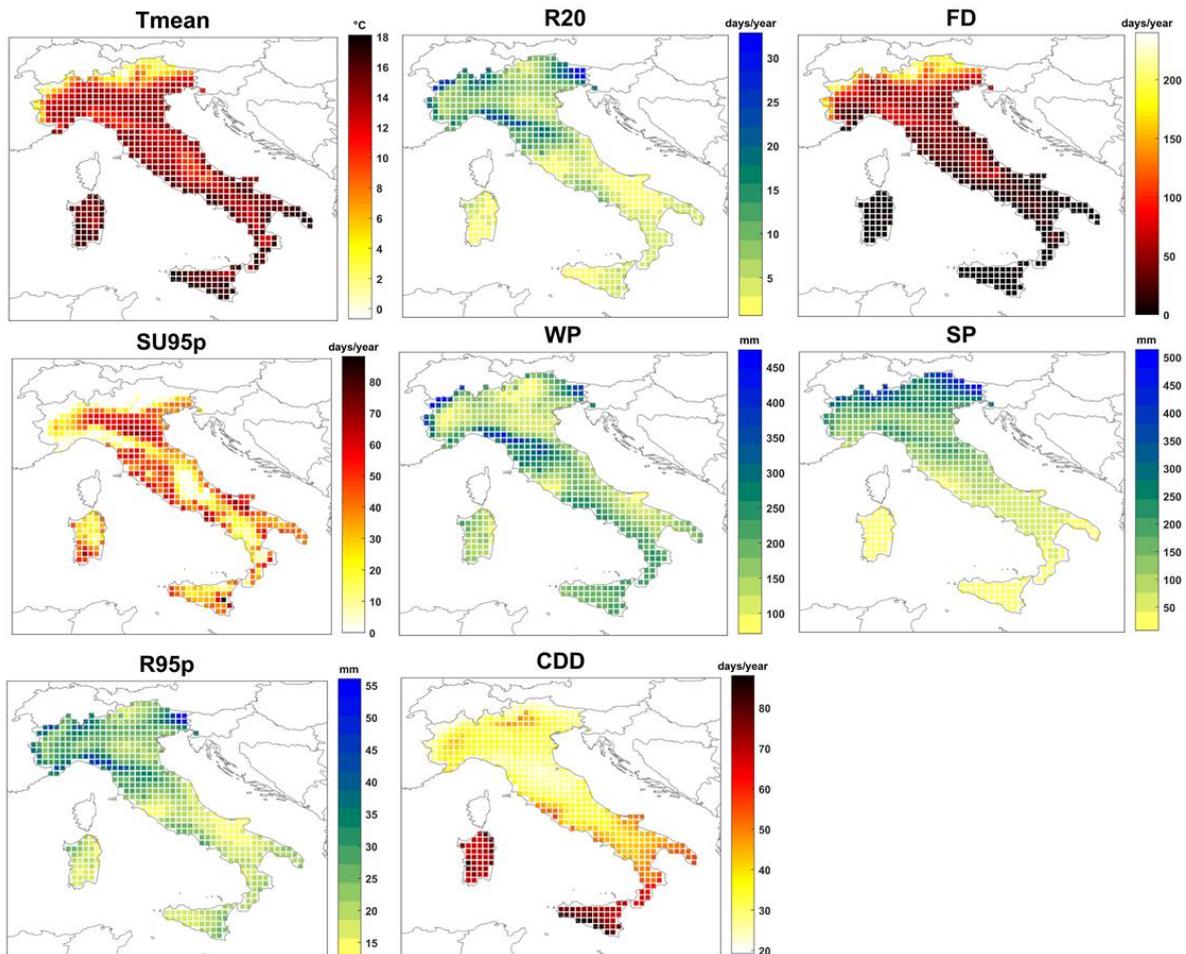


Figura 1: Mappe degli indicatori (E-OBS 1981-2010).

⁴ <http://www.ecad.eu/download/ensembles/download.php#datafiles>

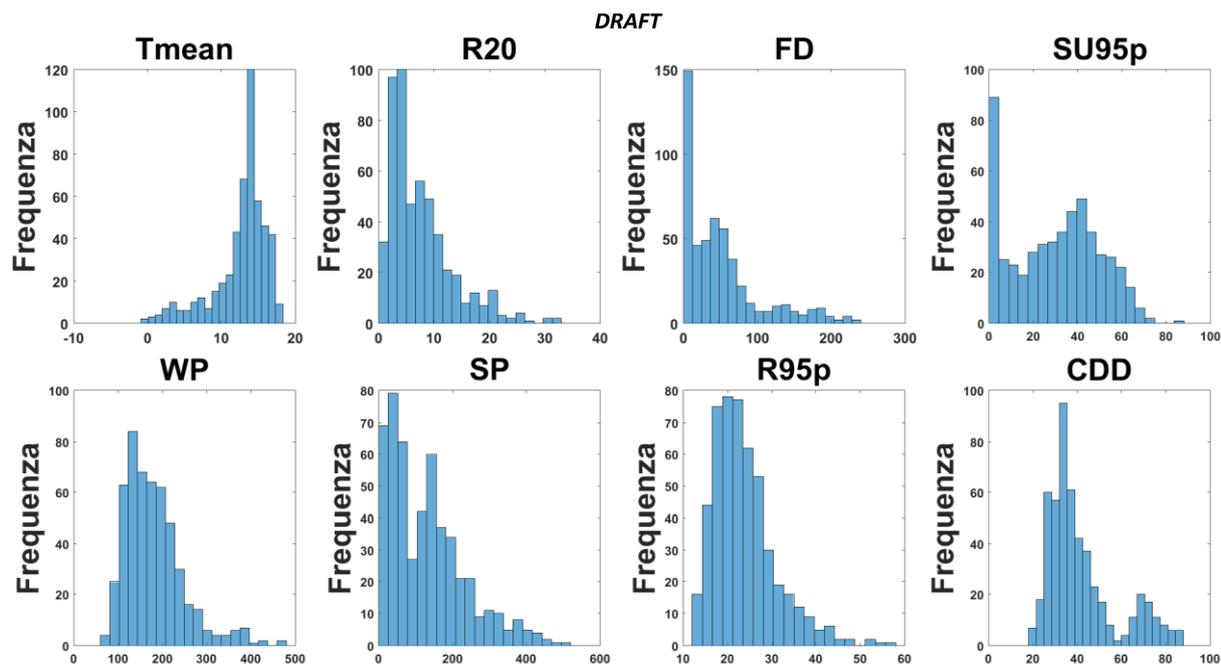


Figura 2: Distribuzioni di frequenza degli indicatori (E-OBS 1981-2010).

Gli indicatori selezionati sono stati raggruppati attraverso metodologie di *cluster analysis* (si veda il Box 1).

In particolare, in tale attività è stato utilizzato un approccio gerarchico, nello specifico il metodo di Ward (Ward 1963), come inizializzazione del metodo partizionale k-means (MacQueen 1967) (Peterson 2011). La cluster analysis ha condotto a definire sei “macroregioni climatiche omogenee” nell’arco temporale 1981-2010. Ciascuna macroregione si caratterizza per valori simili degli indicatori considerati.

I risultati della zonazione climatica sono riportati in Figura 3. Nella Tabella 2 e

Figura 4 sono invece riportati, per tutti gli indicatori i valori medi e la distribuzione relativa ad ogni macroregione individuata. Inoltre, sempre nella Tabella 2, viene riportata tra parentesi tonde, per ciascuna macroregione, una stima della variabilità degli indicatori selezionati in termini di deviazione standard. Tale stima è stata ricavata a partire dalle serie temporali annuali degli indicatori all’interno di ciascuna macroregione sul periodo di riferimento 1981-2010. Si noti che per la zonazione climatica sul periodo di riferimento sono utilizzati solo otto dei dieci indicatori definiti nella Tabella 1, in quanto *la copertura nevosa* e *l’evaporazione* non sono forniti da tale *dataset*. Mentre per la zonazione delle anomalie climatiche, rispetto alla analisi del clima attuale, è stato considerato l’indicatore Evap al posto dell’indicatore CDD ed è stato aggiunto l’indicatore relativo alla copertura nevosa, SC.

Di seguito è riportata una breve descrizione delle sei macroregioni climatiche:

Macroregione 1- Prealpi e Appennino Settentrionale: L’area è caratterizzata da valori intermedi per quanto riguarda i valori cumulati delle precipitazioni invernali ed estive e da valori elevati, rispetto alle altre aree, per i fenomeni di precipitazione estremi (R20 e R95p). Dopo la macroregione 2 risulta essere la zona del Nord Italia con il numero maggiore di *summer days* ovvero con il numero di giorni in cui la temperatura massima ha un valore superiore al valore di soglia considerato (95esimo percentile).

Macroregione 2 - Pianura Padana, alto versante adriatico e aree costiere dell’Italia centro-meridionale. La macroregione è caratterizzata dal maggior numero, rispetto a tutte le altre zone, di giorni, in media, al di sopra della soglia selezionata per classificare i *summer days* (29,2°C) e al contempo da temperature medie elevate; anche il numero massimo di giorni consecutivi senza pioggia risulta essere elevato (CDD) in confronto alle altre zone dell’Italia centro settentrionale; il regime

DRAFT

pluviometrico, in termini di valori stagionali (WP ed SP) ed estremi (R20 e R95p) mostra invece caratteristiche intermedie.

Macroregione 3 - Appennino centro-meridionale e alcune zone limitate dell'Italia nord occidentale. Essa è caratterizzata da ridotte precipitazioni estive e da eventi estremi di precipitazione per frequenza e magnitudo, sebbene le precipitazioni invernali presentino valori medio alti rispetto alle altre macroregioni; anche il numero massimo di giorni consecutivi senza pioggia risulta essere intermedio (CDD), ovvero analogo a quanto osservato nella limitrofa macroregione 2 ma più basso per quanto riguarda la macroregione 6, caratterizzato dal valore di tale indicatore più elevato.

Macroregione 4 - Area alpina. In questa macroregione si riscontra il minimo valore di temperatura media (5.7°C) e il massimo numero di *frost days*; le precipitazioni invernali sono meno abbondanti (143 mm), rispetto alla macroregione climatica 5, che è la più piovosa, ma in assoluto si registra un valore medio-alto, mentre le precipitazioni estive sono le più significative (286 mm) rispetto a tutte le altre macroregioni.

Macroregione 5: Italia settentrionale. l'area è caratterizzata da valori più elevati di precipitazione sia in termini di valori medi invernali (321 mm) che di estremi (R20 e R95p); anche le precipitazioni estive risultano mediamente alte, seconde solo alla zona alpina (macroregione 4). Per quanto riguarda i giorni massimi consecutivi (CDD) asciutti in questa macroregione si trova il valore più basso. Per quanto riguarda i *summer days* il valore che caratterizza tale area è mediamente basso (secondo solo alla zona alpina dove si registra il valore minimo di tale indicatore).

Macroregione 6: Aree insulari e l'estremo sud dell'Italia. Questa macroregione è quella mediamente più calda e secca, contraddistinta dalla temperatura media più alta (16 °C) e dal più alto numero di giorni annui consecutivi senza pioggia (70 giorni/anno); inoltre, tale macroregione è caratterizzata dalle precipitazioni estive mediamente più basse (21 mm) e in generale da eventi estremi di precipitazione ridotti per frequenza e magnitudo.

DRAFT

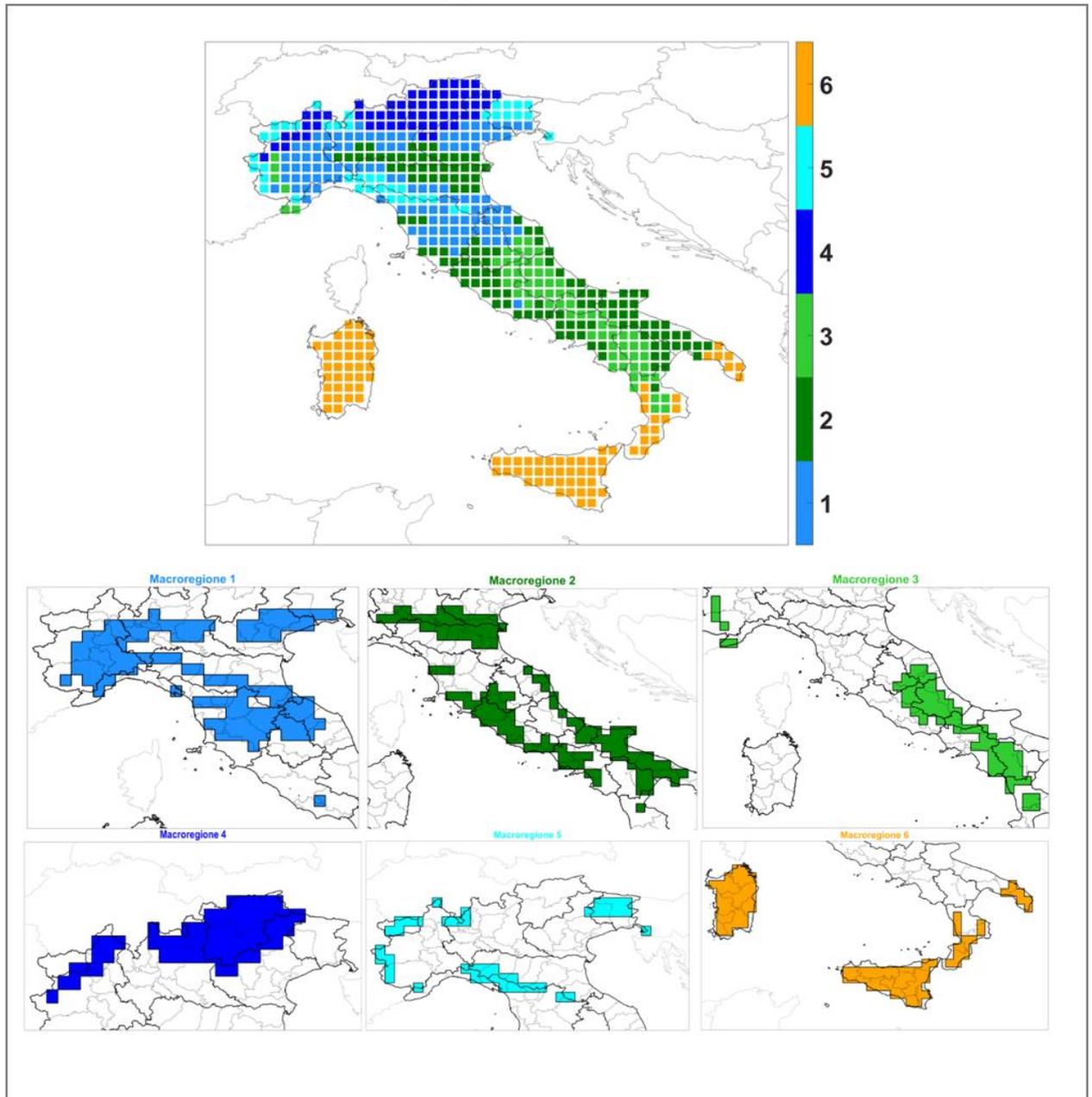


Figura 3: Zonazione climatica sul periodo climatico di riferimento (1981-2010).

DRAFT

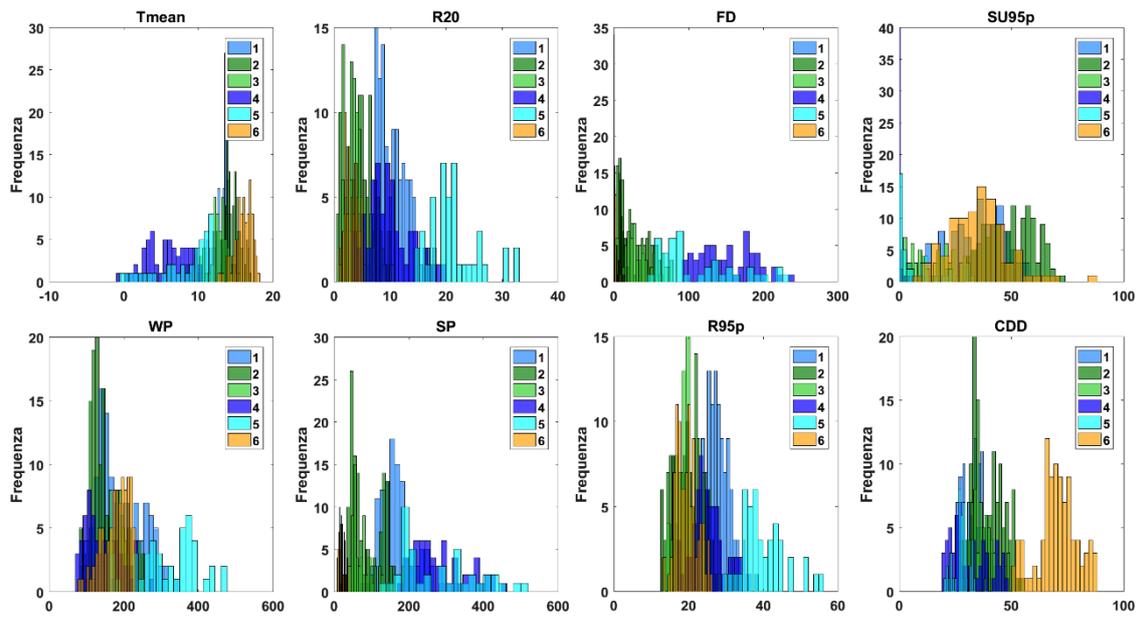


Figura 4: Distribuzione di frequenza degli indicatori per ogni macroregione (zonazione climatica di riferimento)

Tabella 2: Valori medi e deviazione standard degli indicatori per ciascuna macroregione individuata.

	Temperatura media annuale – Tmean (°C) 	Giorni con precipitazioni intense – R20 (giorni/anno) 	Frost days – FD (giorni/anno) 	Summer days – SU95p (giorni/anno) 	Precipitazioni invernali cumulate – WP (mm) 	Precipitazioni cumulate estive – SP (mm) 	95° percentile precipitazioni – R95p (mm) 	Consecutive dry days – CDD (giorni) 
Macroregione 1 Prealpi e Appennino settentrionale	13 (±0.6)	10 (±2)	51 (±13)	34 (±12)	187 (±61)	168 (±47)	28	33 (±6)
Macroregione 2 Pianura Padana, alto versante adriatico e aree costiere dell'Italia centro-meridionale	14.6 (±0.7)	4 (±1)	25 (±9)	50 (±13)	148 (±55)	85 (±30)	20	40 (±8)
Macroregione 3 Appennino centro-meridionale	12.2 (±0.5)	4 (±1)	35 (±12)	15 (±8)	182 (±55)	76 (±28)	19	38 (±9)
Macroregione 4 Area alpine	5.7 (±0.6)	10 (±3)	152 (±9)	1 (±1)	143 (±47)	286 (±56)	25	32 (±8)
Macroregione 5 Italia centro-settentrionale	8.3 (±0.6)	21 (±3)	112 (±12)	8 (±5)	321 (±89)	279 (±56)	40	28 (±5)
Macroregione 6 Aree insulari ed estremo sud Italia	16 (±0.6)	3 (±1)	2 (±2)	35 (±11)	179 (±61)	21 (±13)	19	70 (±16)

ZONAZIONE CLIMATICA DELLE ANOMALIE PER LE PROIEZIONI CLIMATICHE FUTURE (2021-2050)

Lo scopo di questo paragrafo è quello di individuare, tramite l'applicazione di una procedura di cluster analysis analoga a quella impiegata nel precedente paragrafo, aree del territorio italiano omogenee in termini di anomalie climatiche.

Come riferimento allo stato dell'arte sulle proiezioni climatiche in Europa, si faccia riferimento all'iniziativa Euro-Cordex (<http://www.euro-cordex.net>)⁵.

Per le finalità del presente documento, le proiezioni climatiche impiegate, finalizzate alla individuazione delle anomalie, sono state realizzate con il modello RCM COSMO CLM (Rockel and Geyer 2008) nella configurazione ottimizzata dal CMCC (Bucchignani et al. 2016). In particolare, la configurazione utilizzata ha una risoluzione orizzontale di circa 8 km ed è stata forzata dal modello globale CMCC-CM (risoluzione orizzontale 80km) (Scoccimarro et al. 2011).

Questa configurazione ha mostrato una buona capacità di rappresentare il clima italiano, anche su scala locale, sia in termini di valori medi che estremi (Bucchignani et al. 2016; Zollo et al. 2016) attraverso la validazione sia con E-OBS sia con alcuni dataset regionali disponibili. Inoltre, si è verificato che, rispetto agli indicatori selezionati nella *cluster analysis* per effettuare la zonazione climatica, le performance del modello COSMO-CLM risultavano migliori o simili nel caso della temperatura media annuale, rispetto all'*ensemble mean* delle simulazioni EURO-CORDEX (Giorgi et al. 2009) ottenuto con modelli climatici regionali alla risoluzione 0.11° (circa 12 km) per i quali erano disponibili tutte le variabili necessarie per il calcolo degli indicatori e quindi per l'esecuzione di tale confronto. Inoltre, essendo la risoluzione della simulazione utilizzata di circa 8 km, essa consente di ottenere informazioni climatiche ad una scala locale più dettagliata rispetto a quella dei modelli Euro-Cordex, che è circa 12 km, specie per quanto riguarda gli estremi (Zollo et al. 2016).

Informazioni aggiuntive sulle caratteristiche del modello sono disponibili sul sito del consorzio europeo CLM Assembly che ne cura lo sviluppo. Le proiezioni climatiche future sono state ottenute considerando due diversi scenari IPCC: RCP4.5 e RCP8.5. È quindi possibile una valutazione dell'incertezza delle proiezioni climatiche rispetto ai due scenari considerati. Per ulteriori informazioni su scenari e modelli climatici si veda il Box 2.

Prima di analizzare i risultati della zonazione climatica delle anomalie, nella seguente sezione, vengono presentate le proiezioni climatiche del modello selezionato. Si osserva che i valori di anomalia riscontrati in questa analisi, sono qualitativamente consistenti con i risultati mostrati in letteratura per Euro-Cordex (Jacob et al. 2014). La significatività statistica delle anomalie climatiche è stata valutata attraverso il test di Wilcoxon-Mann-Whitney. I risultati del test con livello di confidenza al 95% mostrano che in termini di temperatura le anomalie risultano statisticamente significative su tutto il territorio analizzato, invece in termini di precipitazione si ottengono risultati statisticamente significativi solo per la precipitazione

⁵ L'iniziativa Euro-Cordex ha prodotto un gran numero di simulazioni climatiche con diversi modelli regionali a risoluzioni fino a 12km. L'utilizzo di un approccio multi-model permette di valutare l'incertezza nella previsione di cambiamento e la robustezza del cambiamento previsto dai diversi modelli (Kotlarski et al. 2014) (Jacob et al. 2014).

Allo stato attuale, la procedura di *cluster analysis* richiede la selezione di un unico modello. In quest'ottica sarebbero auspicabili sviluppi futuri nei criteri implementativi della cluster analysis al fine di tener conto della valutazione dell'incertezza associata alle anomalie climatiche.

estiva nel sud Italia. Tali risultati sono in linea con analoghe analisi presenti in letteratura per le proiezioni EURO-CORDEX (Kotlarski et al. 2012) (Jacob et al. 2014).

Nello specifico, sono state valutate:

- (i) le variazioni stagionali di temperatura e precipitazione per il medio (2021-2050) e lungo (2071-2100) periodo;
- (ii) le anomalie trentennali (2021-2050 vs 1981-2010) degli indicatori selezionati per l'analisi della condizione climatica futura.

Le anomalie climatiche si basano sulla differenza tra due periodi, uno futuro e uno di riferimento, entrambi della durata di 30 anni. Tale lunghezza è ritenuta adeguata per la caratterizzazione sia dei valori medi che degli estremi delle variabili atmosferiche di interesse (IPCC 2013). In particolare il periodo di riferimento considerato nel presente documento è stato ottenuto usando:

Per il periodo 1981-2005, i dati di COSMO-CLM forzati dal modello globale CMCC-CM, il quale si basa sullo scenario dell'IPCC *historical experiment* (Meinshausen et al. 2011);

Per il periodo 2006-2010, i dati di COSMO-CLM forzati dal modello globale CMCC-CM, il quale si basa sullo scenario RCP4.5.

La Figura 5 mostra le proiezioni climatiche stagionali di anomalia della temperatura media e delle precipitazioni medie per il periodo 2021-2050, rispetto al periodo di riferimento 1981-2010, per gli scenari RCP4.5 e RCP8.5. Le stagioni sono indicate con la seguente nomenclatura: DJF (December-January-February) per indicare l'inverno, MAM (March-April-May) per indicare la primavera, JJA (June-July-August) per indicare l'estate e SON (September-October-November) per indicare l'autunno.

La Figura 5 evidenzia un generale aumento delle temperature per entrambi gli scenari, più marcato nell'RCP8.5, con un incremento fino a 2 °C. Per quanto riguarda la precipitazione, invece, lo scenario RCP4.5 proietta una generale riduzione in primavera ed un calo più accentuato in estate, soprattutto nel sud Italia e in Sardegna (fino al 60%). L'inverno invece, è caratterizzato da una lieve riduzione di precipitazione che interessa le Alpi e il sud Italia ed un leggero aumento in Sardegna e nella Pianura Padana. Infine in autunno si osserva un generale lieve aumento delle precipitazioni, ad eccezione della Puglia. Lo scenario RCP8.5, invece, proietta un aumento delle precipitazioni invernali ed autunnali sul nord Italia e una lieve riduzione al sud. Le precipitazioni primaverili presentano una diminuzione sul sud Italia, mentre l'estate è caratterizzata da un accentuato aumento delle precipitazioni in Puglia (oltre il 60%) ed una riduzione altrove.

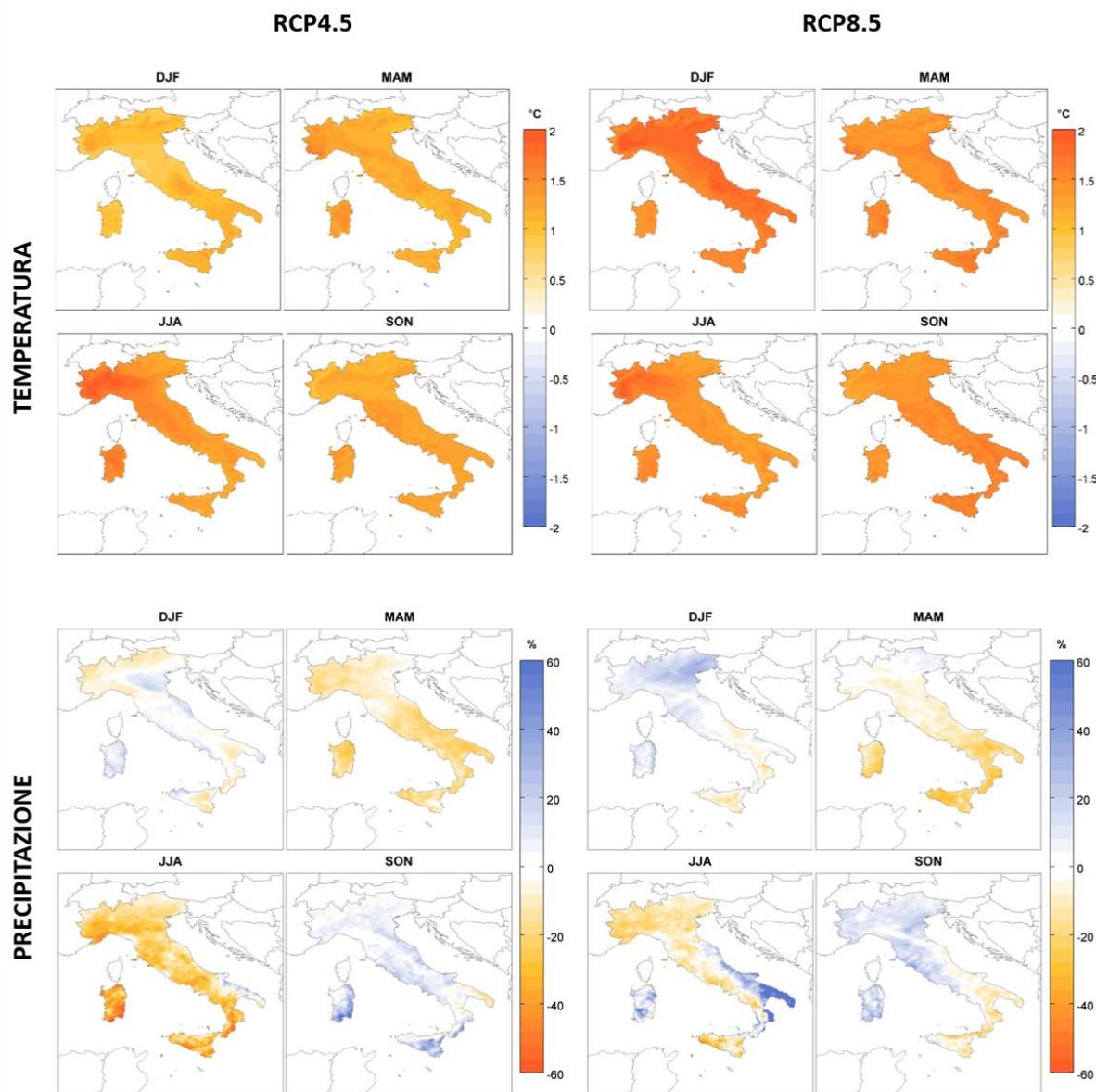


Figura 5: Proiezioni climatiche stagionali di anomalia delle temperature medie e delle precipitazioni cumulate medie per il periodo 2021-2050, rispetto al periodo di riferimento 1981-2010, per gli scenari RCP4.5 ed RCP8.5.

La Figura 6 mostra le proiezioni climatiche stagionali di temperatura e precipitazione per il periodo 2071-2100, rispetto al periodo di riferimento 1981-2010, per gli scenari RCP4.5 ed RCP8.5.

Per quanto riguarda le temperature, le figure mostrano un generale aumento in tutte le stagioni tra i 3 °C e i 4 °C per lo scenario RCP4.5. Invece, lo scenario RCP8.5 mostra un riscaldamento considerevolmente più alto, caratterizzato da una spiccata stagionalità, con un generale aumento sui 7 – 8 °C in estate sull'intero territorio.

In termini di precipitazioni, lo scenario RCP4.5 indica in inverno un moderato aumento al nord ed una lieve riduzione al sud, mentre l'autunno è caratterizzato da una generale tendenza all'aumento della

precipitazione ad eccezione di alcune zone lungo l'Appennino e in Calabria. In primavera si osserva una generale riduzione delle precipitazioni, mentre in estate si nota un calo più accentuato (fino al 60%) ad eccezione della Puglia, caratterizzata da un aumento. Il segnale di cambiamento climatico proiettato dallo scenario RCP8.5 è analogo a quello dell'RCP4.5 per inverno, primavera ed estate, ma con valori più accentuati. In particolare in estate non si osserva più l'aumento di precipitazioni sulla Puglia e la generale riduzione di precipitazione raggiunge valori fino al 100%. Infine in autunno si nota un segnale di cambiamento climatico quasi stazionario, ad eccezione dell'Appennino e del sud Italia, in cui si osserva una riduzione delle precipitazioni.

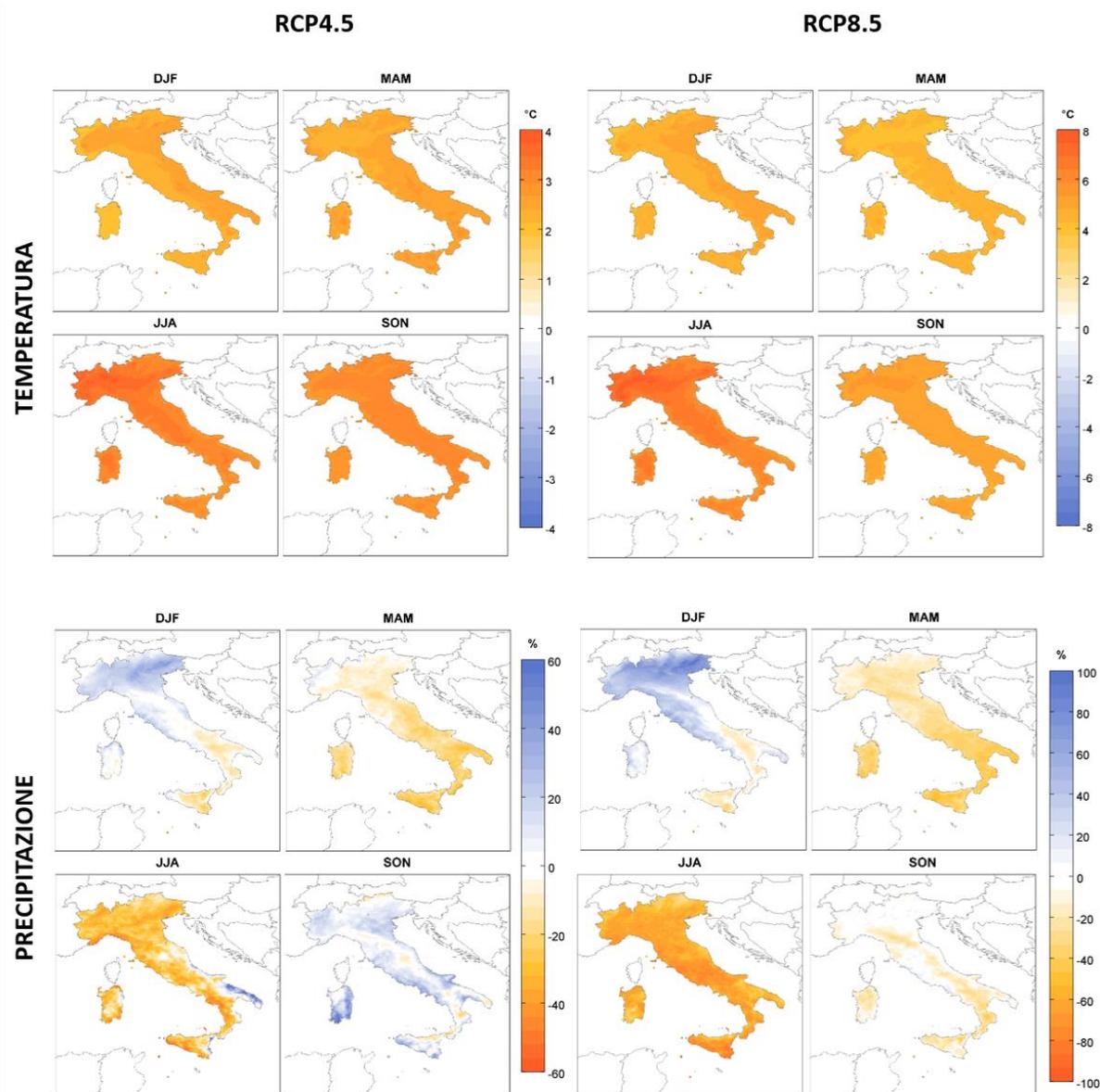


Figura 6: Proiezioni climatiche stagionali di anomalia delle temperatura media e delle precipitazioni cumulate medie per il periodo 2071-2100, rispetto al periodo di riferimento 1981-2010, per gli scenari RCP4.5 ed RCP8.5.

Successivamente alla valutazione del quadro climatico basata sulle proiezioni climatiche stagionali di anomalia della temperatura media e delle precipitazioni cumulate medie, gli indicatori selezionati per l'analisi della condizione climatica futura sono stati calcolati con i dati simulati dal modello climatico regionale COSMO-CLM per il periodo di riferimento (1981-2010) e per il periodo intermedio 2021-2050 con gli scenari RCP4.5 e RCP8.5. In questo caso, rispetto all'analisi del clima attuale, è stato considerato l'indicatore Evap al posto dell'indicatore CDD ed è stato aggiunto l'indicatore relativo alla copertura nevosa, SC.

Le anomalie climatiche sono ottenute come differenza tra i valori medi degli indicatori nel periodo futuro 2021-2050 e quello di riferimento 1981-2010.

Le anomalie climatiche sono espresse in parte in valori assoluti (*temperatura media annuale, giorni di precipitazione intensa, frost days, summer days, copertura nevosa*) e in parte in valori relativi (*cumulata delle precipitazioni invernali, cumulata delle precipitazioni estive, evaporazione cumulata annuale, 95° percentile della precipitazione*)

Le distribuzioni spaziali e le distribuzioni di frequenza delle anomalie impiegate per la zonazione climatica con scenario RCP4.5 vengono illustrate rispettivamente nella Figura 7 e nella Figura 9, mentre con scenario RCP8.5 nella Figura 8 e nella Figura 10. Esse evidenziano come la variabilità dell'anomalia di temperatura media sul territorio nazionale sia limitata rispetto alla variabilità che si registra per gli altri indicatori, indipendentemente dallo scenario considerato. La stessa limitata variazione in frequenza si ritrova per l'indicatore R20 per entrambi gli scenari. Le variazioni nei valori di precipitazione (sia media che estrema) mostrano una maggiore variabilità per segno (aumento o diminuzione) ed intensità.

Per quanto riguarda i *frost days*, entrambi gli scenari registrano variazioni unicamente negative ma per lo scenario RCP8.5 tali variazioni risultano essere più marcate. Per quanto attiene l'indicatore R95p risulta avere per entrambi gli scenari presenta una distribuzione della variazione simile ma con valori di frequenza più elevati per lo scenario RCP8.5.

In entrambi gli scenari, gli indicatori associati alla temperatura indicano un generalizzato incremento dei valori: aumento nei valori medi e dei *summer days* (SU95p).

Con lo scenario RCP4.5 si osserva una riduzione generale delle precipitazioni estive (SP) ad esclusione del basso versante adriatico, una riduzione delle precipitazioni invernali sulle Alpi, sugli Appennini e in Calabria e nell'area centro-orientale della Sicilia, ed una riduzione complessiva dell'evaporazione su tutto il territorio, specie in parte della Puglia e in Basilicata, escludendo le Alpi (probabilmente associato all'incremento di temperatura e variazione della copertura nevosa). Per quanto riguarda l'indicatore R20 si registrano variazioni contenute nell'intero territorio nazionale ad eccezione delle Alpi, con dei picchi su quelle occidentali. Per quanto riguarda la copertura nevosa e i *frost days* si registra una loro diminuzione generale, specie sulle aree montane prevalentemente interessate da tali fenomeni.

Invece, lo scenario RCP8.5 proietta un aumento significativo delle precipitazioni estive sul basso versante adriatico (rispetto allo scenario di riferimento su questa zona), e un aumento complessivo nel centro-nord delle precipitazioni invernali e dell'evaporazione, a differenza del sud Italia dove si registra un comportamento opposto; per quanto concerne gli eventi estremi, è stimato un aumento generalizzato nella magnitudo (R95p) mentre le variazioni dell'indicatore R20 ricalcano quelle della

precipitazione invernale con un aumento nell'Italia Centro-Settentrionale ed una riduzione nelle aree meridionali.

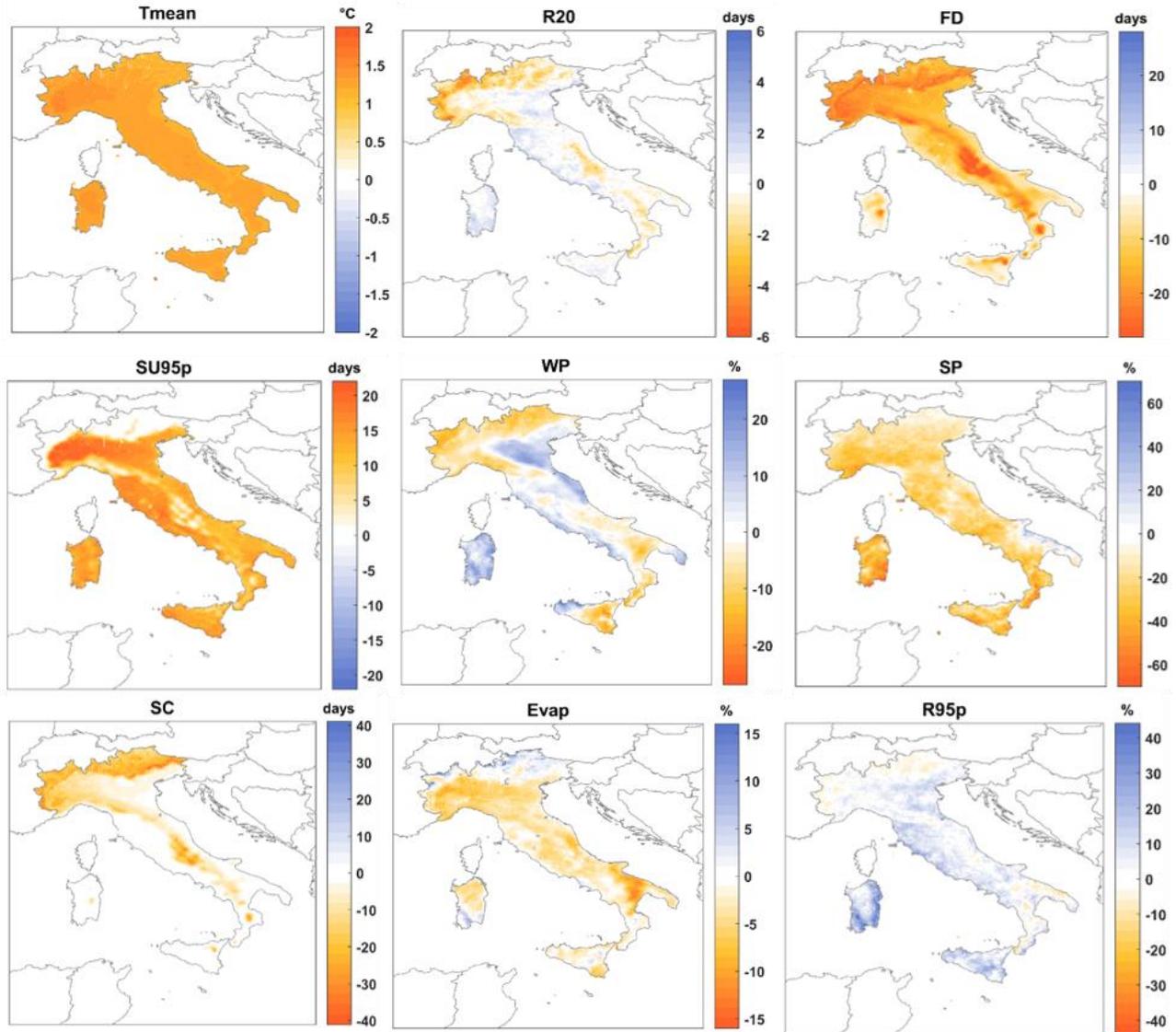


Figura 7: Mappe delle anomalie (COSMO RCP4.5 2021-2050 vs 1981-2010).

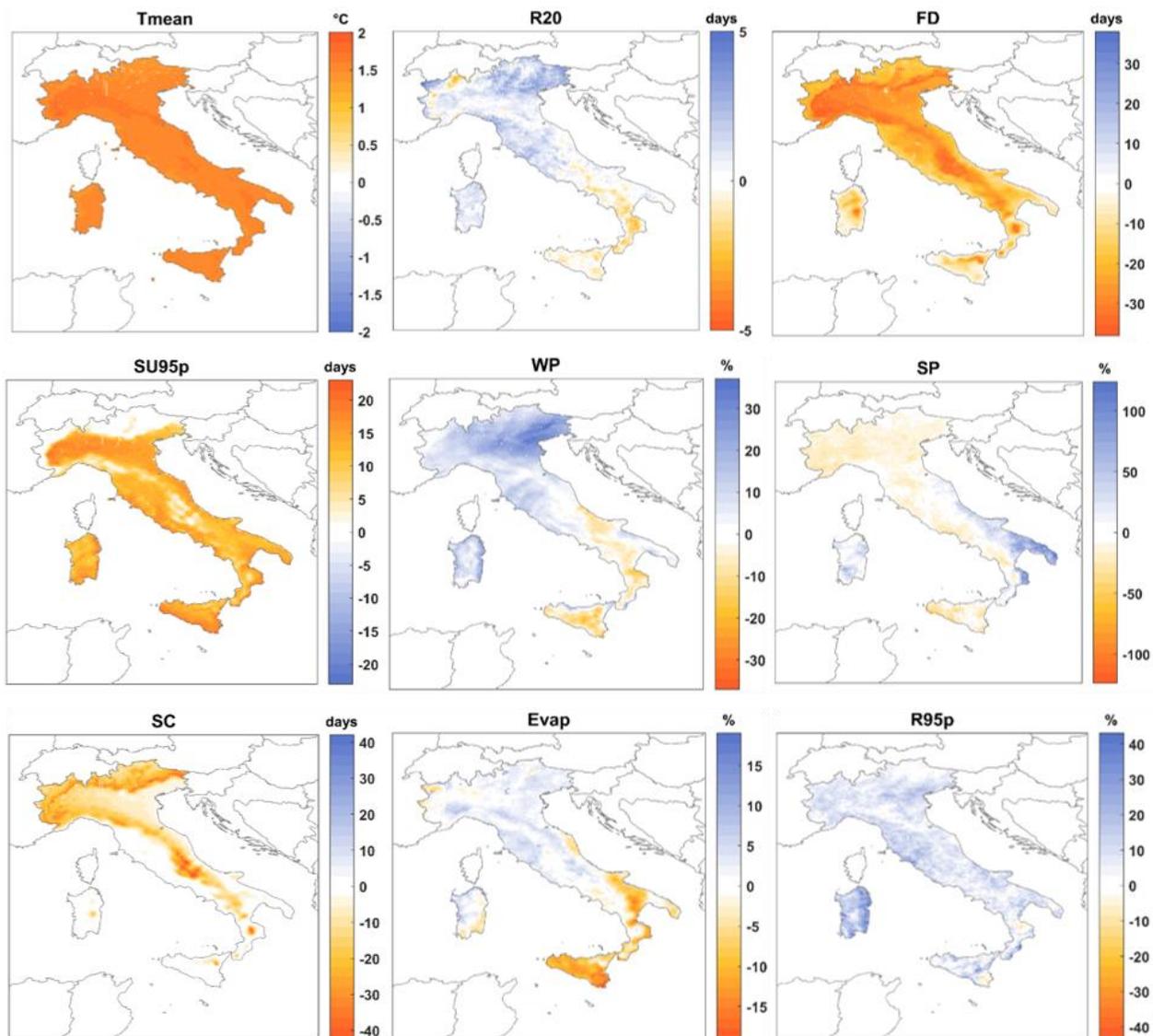


Figura 8: Mappe delle anomalie (COSMO RCP8.5 2021-2050 vs 1981-2010)

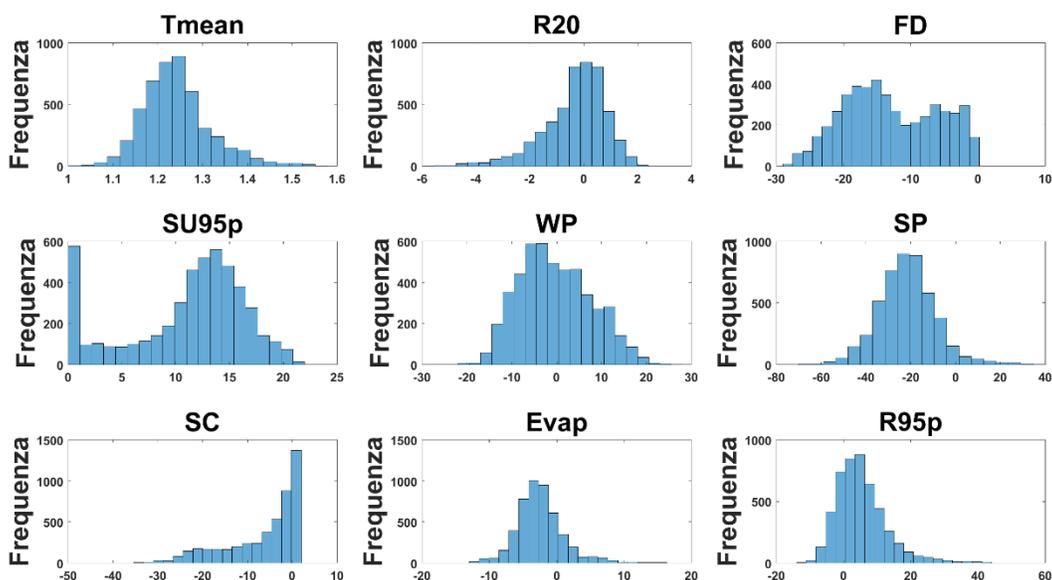


Figura 9: Distribuzioni di frequenza delle anomalie (COSMO RCP4.5 2021-2050 vs 1981-2010).

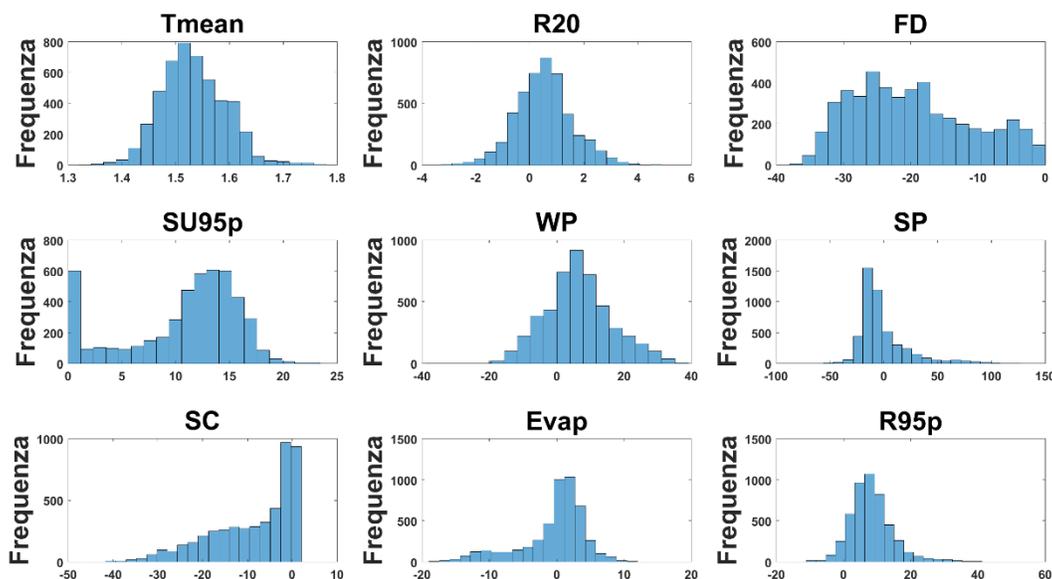


Figura 10: Distribuzioni di frequenza delle anomalie (COSMO RCP8.5 2021-2050 vs 1981-2010).

Al fine di individuare aree climatiche omogenee nazionali per anomalie, i valori degli indicatori sono stati raggruppati in categorie omogenee denominate “cluster di anomalie”. La zonazione climatica delle anomalie ha individuato cinque cluster di anomalie (da A a E) mostrate in Figura 11a per lo scenario RCP4.5 e in Figura 12a per lo scenario RCP8.5, mentre la Figura 11b e Figura 12b mostrano la distribuzione delle anomalie all’interno delle singole classi. Infine, la Figura 11 e la Figura 12 restituiscono i valori medi, in termini di anomalia, per le singole classi.

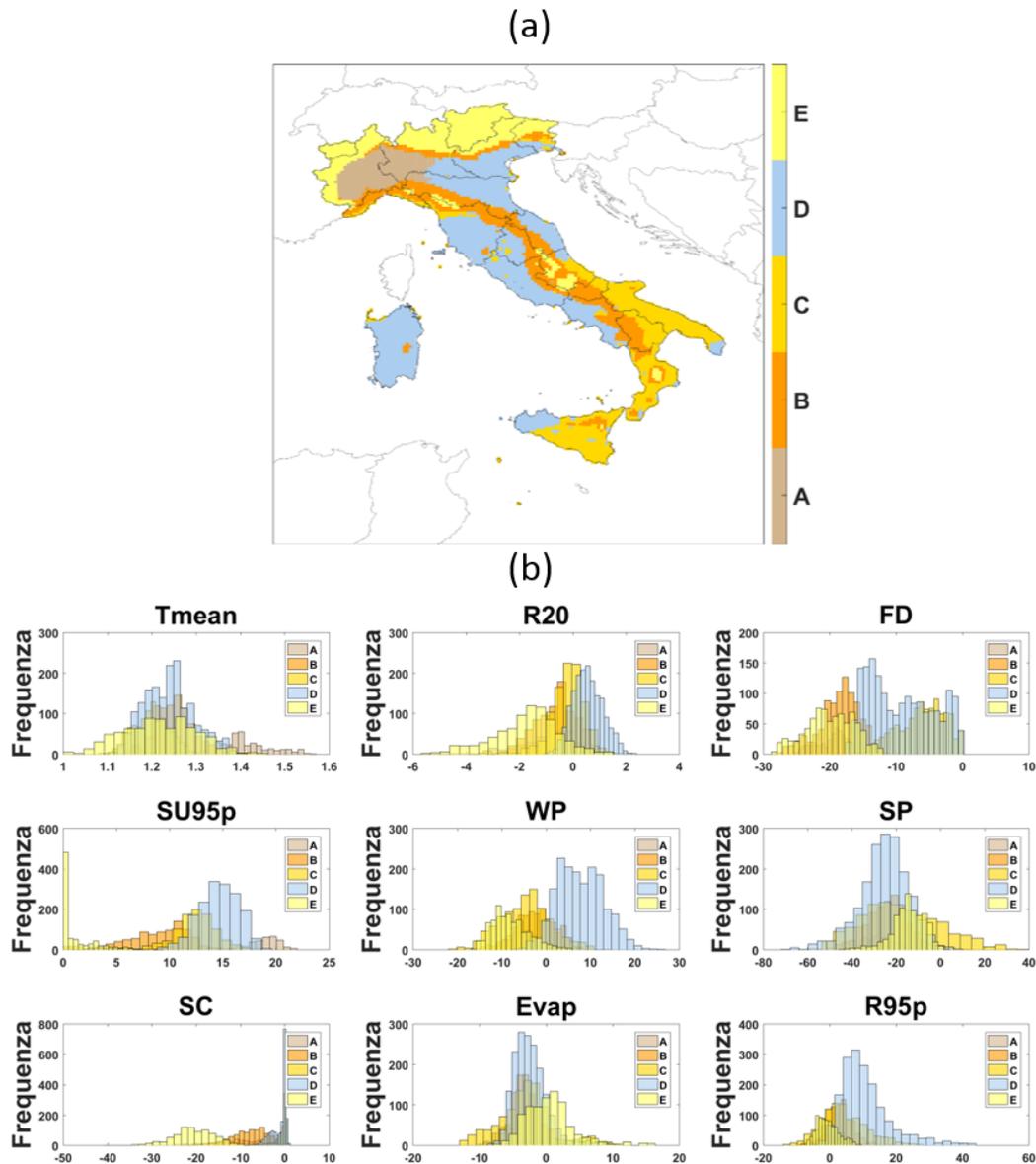


Figura 11: Scenario RCP4.5: (a) Mappa dei cluster individuati, (b) Distribuzioni di frequenza delle anomalie all'interno dei cluster individuati.

Tabella 3: Valori medi dei cluster individuati (COSMO RCP4.5 2021-2050 vs 1981-2010).

CLUSTER	Tmean (°C)	R20 (giorni/anno)	FD (giorni/anno)	SU95p (giorni/anno)	WP (%)	SP (%)	SC (giorni/anno)	Evap (%)	R95p (%)
A	1.4	-1	-20	18	-4	-27	-12	-6	1
B	1.3	-1	-19	9	-2	-24	-8	-3	3
C	1.2	0	-6	12	-5	-18	-1	-3	4
D	1.2	1	-9	14	8	-25	-1	-2	11
E	1.2	-2	-20	1	-8	-15	-21	1	-1

Per lo scenario RCP 4.5 l'analisi evidenzia le seguenti caratteristiche:

Cluster A (caldo-secco estivo): il cluster è caratterizzato da un aumento significativo dei *summer days* (di 18 giorni/anno) e da una riduzione delle precipitazioni invernali e, soprattutto, di quelle estive (valore medio della riduzione pari al 27%). Il cluster A presenta una riduzione rilevante anche dei *frost days*, della copertura nevosa e dell'evaporazione.

Cluster B (caldo invernale-secco estivo): analogamente al cluster A, è interessato da una riduzione sia delle precipitazioni estive (valore medio della riduzione pari al 24%) sia dei *frost days* (di 19 giorni/anno). Si osserva anche una moderata riduzione della copertura nevosa (di 8 giorni/anno).

Cluster C (secco): in questo cluster si osserva una riduzione delle precipitazioni invernali, a cui si aggiunge anche la riduzione, sebbene di minor entità, di quelle estive. Inoltre, si ha un aumento moderato dei *summer days* (di 12 giorni/anno).

Cluster D (piovoso invernale-secco estivo): il cluster D è interessato da un aumento delle precipitazioni invernali (valore medio dell'aumento pari all'8%) e da una riduzione notevole di quelle estive (valore medio della riduzione pari al 25%). In generale si ha un aumento significativo sia dei fenomeni di precipitazione estremi (R95p) sia dei *summer days* (di 14 giorni/anno).

Cluster E (secco-caldo invernale): si osserva una riduzione generale dei fenomeni di precipitazione. Inoltre, si osserva una riduzione significativa dei *frost days* (di 20 giorni/anno) e della copertura nevosa (di 21 giorni/anno).

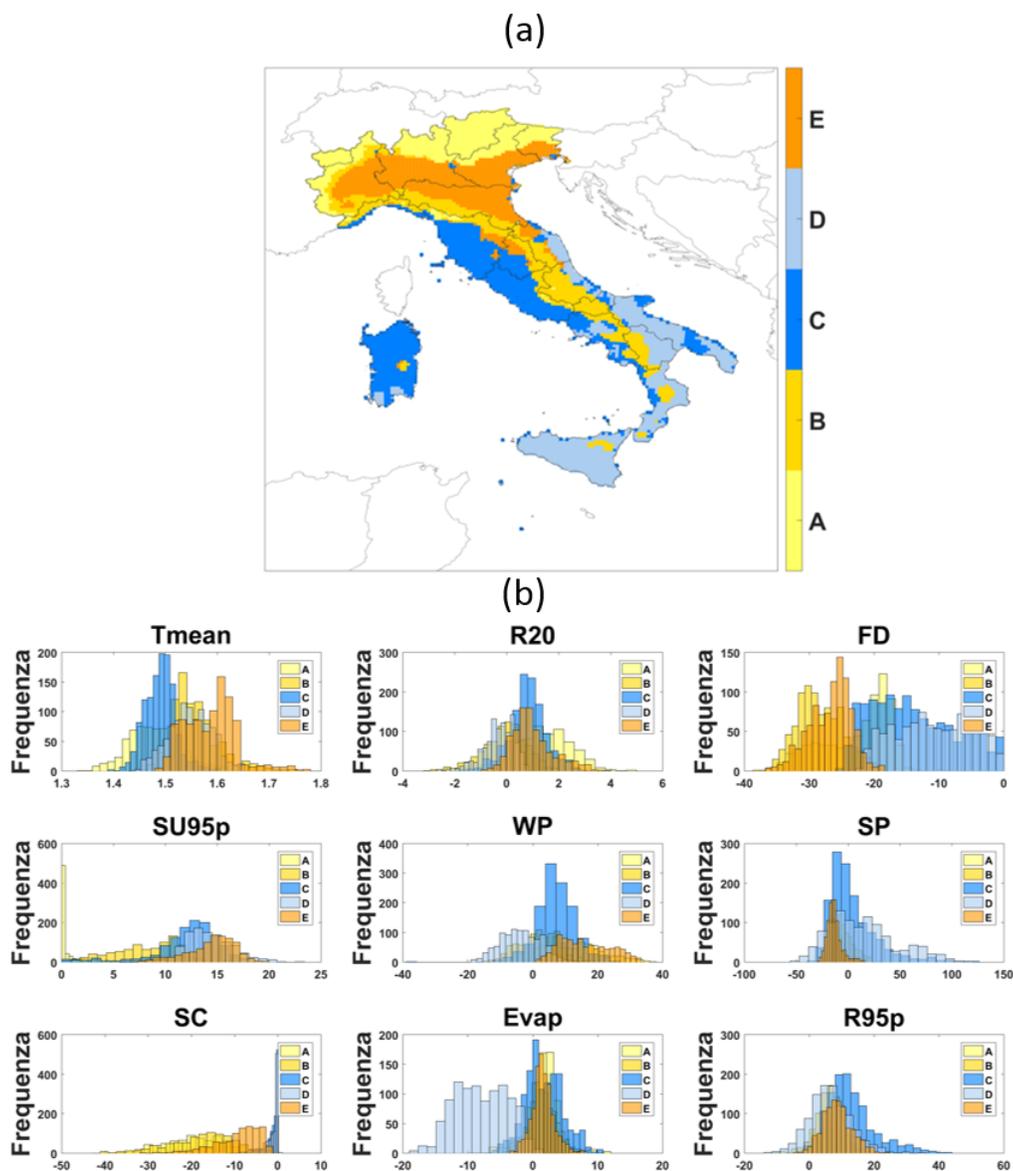


Figura 12: Scenario RCP8.5: (a) Mappa dei cluster individuati, (b) Distribuzioni di frequenza delle anomalie all'interno dei cluster individuati.

Tabella 4: Valori medi dei cluster individuati (COSMO RCP8.5 2021-2050 vs 1981-2010).

CLUSTER	Tmean (°C)	R20 (giorni/anno)	FD (giorni/anno)	SU95p (giorni/anno)	WP (%)	SP (%)	SC (giorni/anno)	Evap (%)	R95p (%)
A	1.5	1	-23	1	13	-11	-20	2	5
B	1.6	0	-28	8	2	-7	-18	1	6
C	1.5	1	-14	12	7	3	-1	2	13
D	1.5	0	-10	14	-4	14	-1	-8	6
E	1.5	1	-27	14	16	-14	-9	2	9

Per lo scenario RCP 8.5 l'analisi evidenzia le seguenti caratteristiche:

Cluster A (piovoso invernale-secco estivo): il cluster A è interessato da un aumento delle precipitazioni invernali (valore medio dell'aumento pari al 13%) e da una riduzione di quelle estive (valore medio della riduzione pari all' 11%). Inoltre si osserva una riduzione significativa sia dei *frost days* (di 23 giorni/anno) che della copertura nevosa (di 20 giorni/anno).

Cluster B (caldo invernale): il cluster B è interessato da una riduzione significativa sia dei *frost days* (di 28 giorni/anno) che della copertura nevosa (di 18 giorni/anno). Inoltre si osserva una riduzione moderata delle precipitazioni estive (valore medio della riduzione pari al 7%).

Cluster C (piovoso-caldo estivo): il cluster C è interessato da un aumento sia delle precipitazioni invernali che di quelle estive e da un aumento significativo dei fenomeni di precipitazione estremi (valore medio dell'aumento pari al 13%). Infine, si osserva un aumento rilevante dei *summer days* (di 12 giorni/anno).

Cluster D (secco invernale-caldo estivo): per il cluster D si osserva una complessiva riduzione di precipitazioni invernali e un aumento rilevante di quelle estive (si tenga conto che si tratta di valori percentuali calcolati rispetto a valori assoluti di precipitazione estiva caratteristici bassi). Inoltre si ha un aumento notevole dei *summer days* (di 14 giorni/anno) ed una riduzione complessiva dell'evaporazione (valore medio della riduzione pari all'8%).

Cluster E (caldo-piovoso invernale-secco estivo): il cluster risulta caratterizzato da un aumento significativo sia dei *summer days* (di 14 giorni/anno) che dei fenomeni di precipitazione estremi (valore medio dell'aumento pari al 9%). Inoltre si osserva una rilevante riduzione delle precipitazioni estive (valore medio della riduzione pari al 14%) ed un aumento significativo delle precipitazioni invernali (valore medio dell'aumento pari al 16%). Il cluster E presenta anche una notevole riduzione dei *frost days* (di 27 giorni/anno).

Tra i due scenari considerati si evidenziano alcune differenze in termini di eventi estremi: per lo scenario RCP8.5 si osserva un aumento significativo del 95° percentile della precipitazione (R95p) rispetto allo scenario RCP4.5. Inoltre, mentre le anomalie WP e SP per lo scenario RCP4.5 mostrano una riduzione (WP aumenta solo per il cluster D, come mostrato in Figura 11a), nel caso dello scenario RCP8.5 si individuano zone in cui si osserva anche un aumento di precipitazioni estive (cluster C e D, Figura 12a) ed invernali (cluster A, B, C e E, Figura 12a).

I valori medi delle anomalie per ciascun cluster sono presentati graficamente in Figura 13 (per lo scenario RCP4.5) e in Figura 14 (per lo scenario RCP8.5). I valori sono stati standardizzati nell'intervallo [0,1] al fine di uniformare le diverse scale delle anomalie. Il punto "zero" denota l'assenza di variazione dell'indicatore.

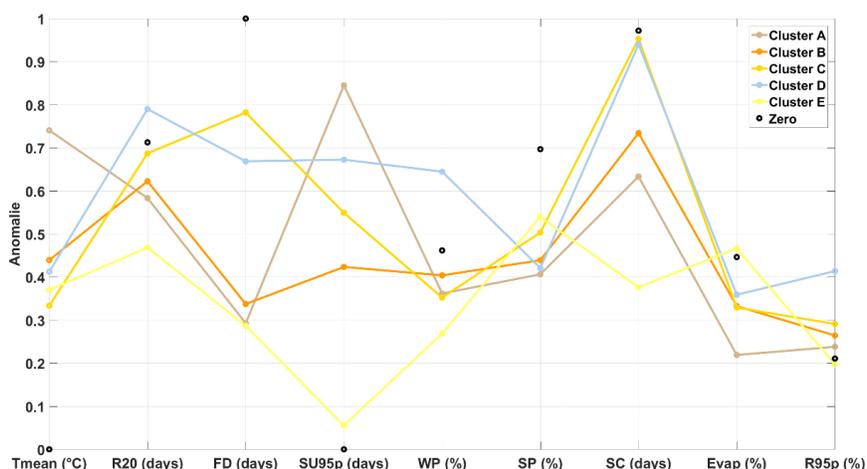


Figura 13: Valori medi delle anomalie all'interno dei cluster (COSMO RCP4.5 2021-2050 vs 1981-2010).

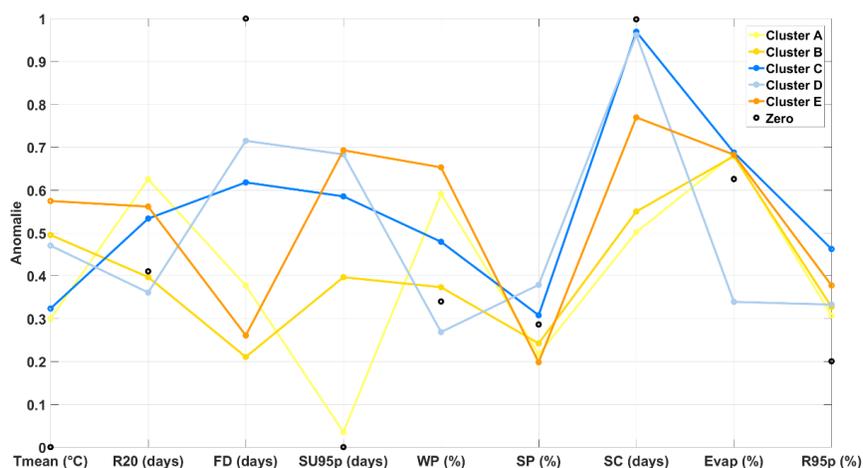


Figura 14: Valori medi delle anomalie all'interno dei cluster (COSMO RCP8.5 2021-2050 vs 1981-2010).

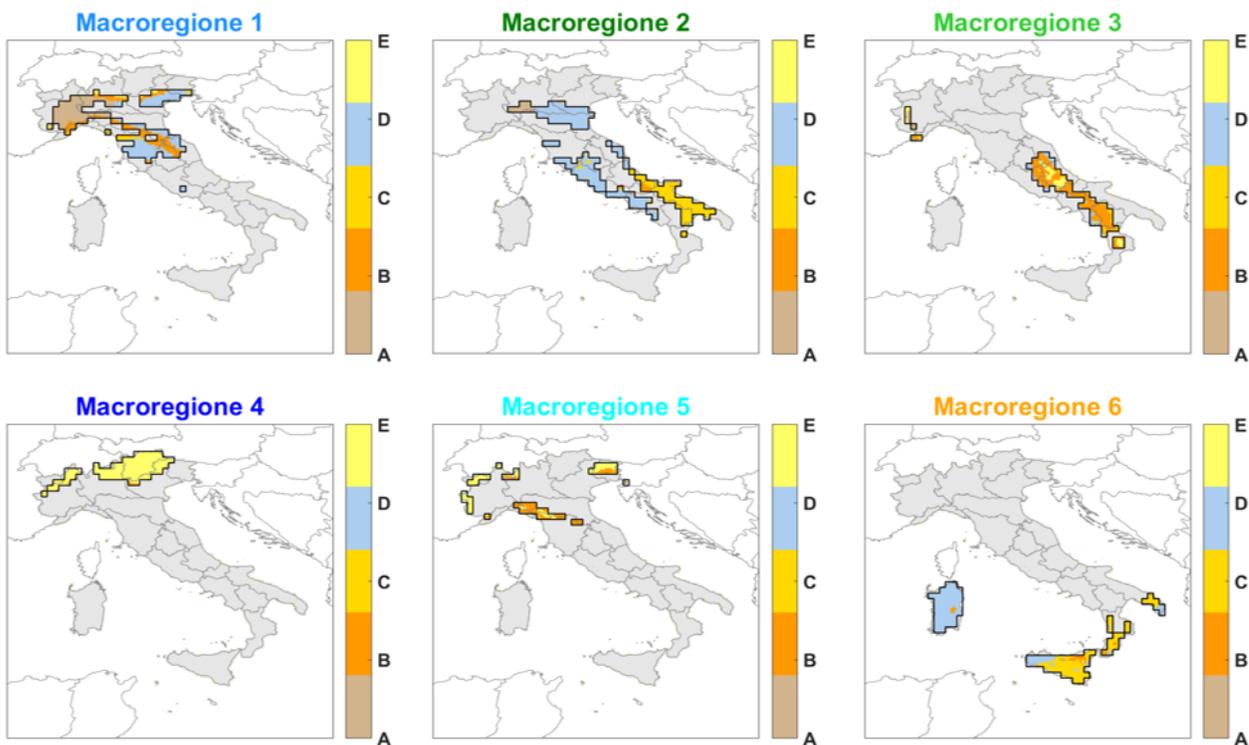
INDIVIDUAZIONE DELLE AREE CLIMATICHE OMOGENEE

Dall'intersezione delle 6 macroregioni climatiche omogenee identificate con l'analisi del clima attuale (Figura 3) e i 5 cluster di anomalie (Figura 11 e Figura 12) scaturiscono 13 principali "aree climatiche omogenee" per i due scenari (RCP4.5 e RCP8.5), ossia le aree del territorio nazionale con uguale condizione climatica attuale e stessa proiezione climatica di anomalia futura.

Per agevolare i successivi studi settoriali e facilitare il lettore nell'individuazione delle anomalie prevalenti per ciascuna macroregione climatica omogenea, i cluster delle anomalie sono stati visualizzati separatamente per ognuna delle sei macroregioni climatiche omogenee, sia per lo scenario RCP4.5 (Figura 15) che per lo scenario RCP8.5 (Figura 16).

L'individuazione delle aree climatiche omogenee va intesa come strumento di sintesi, di supporto agli esperti, per la caratterizzazione della condizione climatica attesa e non come unico strumento di valutazione del cambiamento climatico. Inoltre, nei successivi capitoli inerenti gli impatti, gli esperti di settore hanno utilizzato anche altri indicatori di loro specifico interesse, in aggiunta a quelli utilizzati nella *cluster analysis*, oltre che i risultati dell'analisi di rischio riportata nei paragrafi successivi.

La Tabella 5 e la Tabella 6 forniscono, rispettivamente per lo scenario RCP4.5 ed RCP8.5, una descrizione sintetica delle aree climatiche omogenee principali che ricadono nelle macroregioni.



Macroregioni climatiche omogenee

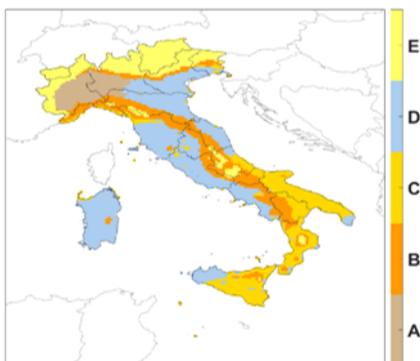


Cluster delle anomalie

Valori medi delle macroregioni

Macroregioni	Tmean (°C)	R20 (giorni/anno)	FD (giorni/anno)	SU95p (giorni/anno)	WP (mm)	SP (mm)	R95p (mm)	CDD (giorni/anno)
1	13	10	51	34	187	168	28	33
2	14,6	4	25	50	148	85	20	40
3	12,2	4	35	15	182	76	19	38
4	5,7	10	152	1	143	286	25	32
5	8,3	21	112	8	321	279	40	28
6	16	3	2	35	179	21	19	70

Valori medi dei cluster delle anomalie (2021-2050 vs 1981-2010)

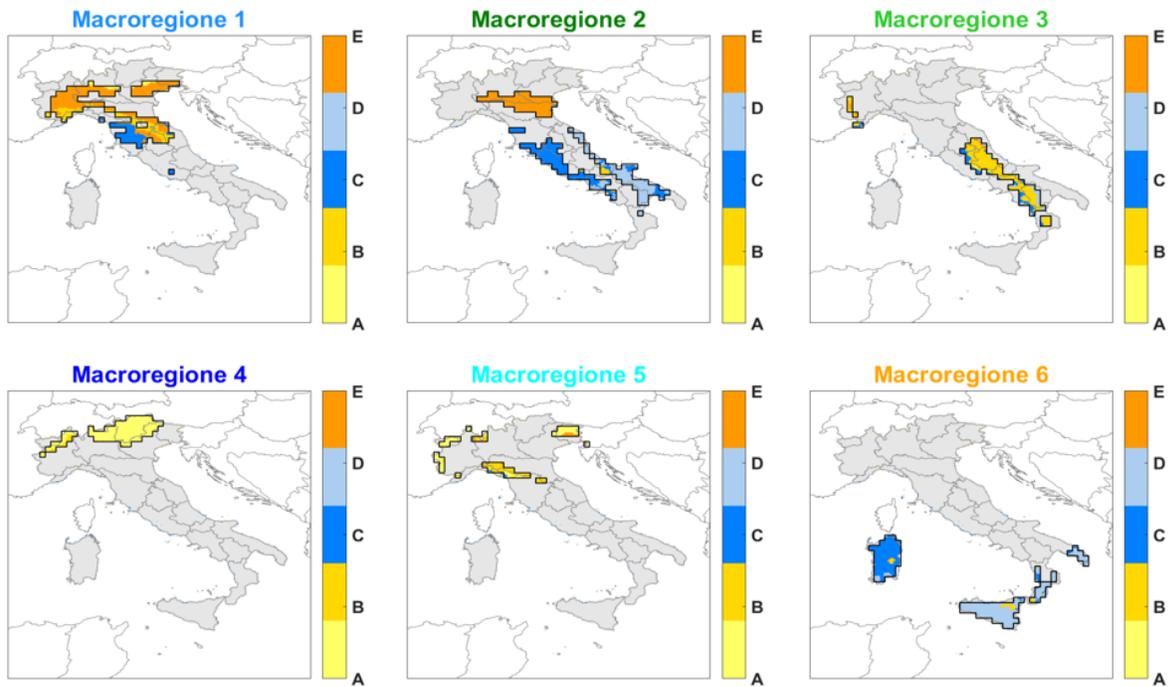


CLUSTER	Tmean (°C)	R20 (giorni/anno)	FD (giorni/anno)	SU95p (giorni/anno)	WP (mm)	SP (mm)	SC (giorni/anno)	Evap (mm/anno)	R95p (mm)
A	1,4	-1	-20	18	-4	-27	-12	-6	1
B	1,3	-1	-19	9	-2	-24	-8	-3	3
C	1,2	0	-6	12	-5	-18	-1	-3	4
D	1,2	1	-9	14	8	-25	-1	-2	11
E	1,2	-2	-20	1	-8	-15	-21	1	-1

Figura 15: Zonazione climatica delle anomalie (2021-2050 vs 1981-2010, scenario RCP4.5) per ciascuna delle sei macroregioni. Per agevolare la lettura sono state riportate anche le informazioni relative alla zonazione di riferimento (1981-2010) e al quadro complessivo dei cluster delle anomalie.

Tabella 5: Descrizione delle aree climatiche omogenee per macroregione (COSMO RCP4.5).

Macroregioni climatiche omogenee	Descrizione delle aree climatiche omogenee principali che ricadono nelle macroregioni considerando lo scenario RCP4.5
1	<i>Aree climatiche omogenee: 1A, 1B e 1D.</i> <i>Anomalie principali:</i> in generale, per l'intera macroregione 1, si ha una riduzione rilevante delle precipitazioni estive e dei <i>frost days</i> . In particolare la macroregione 1 risulta piuttosto eterogenea in termini di aree climatiche omogenee presenti.
2	<i>Aree climatiche omogenee 2A, 2C, 2D.</i> <i>Anomalie principali:</i> il versante tirrenico e la maggior parte della Pianura Padana sono interessati da un aumento delle precipitazioni invernali e da una riduzione di quelle estive. Invece, per la parte ovest della pianura Padana e il versante adriatico, si osserva una riduzione sia delle precipitazioni estive che di quelle invernali. In generale si ha un aumento significativo dei <i>summer days</i> per l'intera macroregione 2.
3	<i>Aree climatiche omogenee: 3B, 3E.</i> <i>Anomalie principali:</i> per l'Appennino centro-meridionale si osserva una marcata riduzione delle precipitazioni estive, con l'area più interna caratterizzata da una riduzione delle precipitazioni sia estive che invernali. L'intera macroregione 3 presenta una riduzione complessiva dei <i>frost day</i> .
4	<i>Aree climatiche omogenee: 4E.</i> <i>Anomalie principali:</i> si osserva una riduzione degli eventi estremi, una riduzione complessiva dei <i>frost days</i> e della copertura nevosa.
5	<i>Aree climatiche omogenee: 5B, 5E.</i> <i>Anomalie principali:</i> all'interno della macroregione 5, caratterizzata in base al periodo di riferimento dai valori più rilevanti di precipitazione, si assiste ad una riduzione significativa delle precipitazioni e dei <i>frost days</i> .
6	<i>Aree climatiche omogenee: 6C, 6D.</i> <i>Anomalie principali:</i> per l'intera macroregione 6, area più calda e secca rispetto al periodo di riferimento, si osserva una complessiva riduzione delle precipitazioni estive ed un aumento moderato dei <i>summer days</i> . Inoltre la Sardegna e parte della Sicilia sono caratterizzate da un aumento delle precipitazioni invernali.



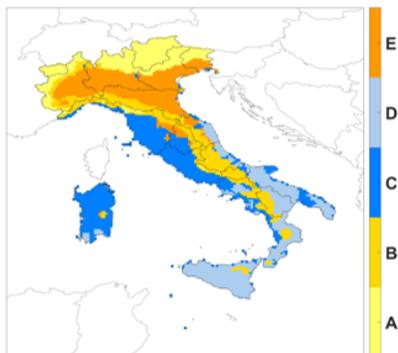
Macroregioni climatiche omogenee



Valori medi delle macroregioni

Macroregioni	Tmean (°C)	R20 (giorni/anno)	FD (giorni/anno)	SU95p (giorni/anno)	WP (mm)	SP (mm)	R95p (mm)	CDD (giorni/anno)
1	13	10	51	34	187	168	28	33
2	14.6	4	25	50	148	85	20	40
3	12.2	4	35	15	182	76	19	38
4	5.7	10	152	1	143	286	25	32
5	8.3	21	112	8	321	279	40	28
6	16	3	2	35	179	21	19	70

Cluster delle anomalie



Valori medi dei cluster delle anomalie (2021-2050 vs 1981-2010)

CLUSTER	Tmean (°C)	R20 (giorni/anno)	FD (giorni/anno)	SU95p (giorni/anno)	WP (mm)	SP (mm)	SC (giorni/anno)	Evap (mm/anno)	R95p (mm)
A	1.5	1	-23	1	13	-11	-20	2	5
B	1.6	0	-28	8	2	-7	-18	1	6
C	1.5	1	-14	12	7	3	-1	2	13
D	1.5	0	-10	14	-4	14	-1	-8	6
E	1.5	1	-27	14	16	-14	-9	2	9

Figura 16: Zonazione climatica delle anomalie (2021-2050 vs 1981-2010, scenario RCP8.5) per ciascuna delle sei macroregioni. Per agevolare la lettura sono state riportate anche le informazioni relative alla zonazione di riferimento (1981-2010) e al quadro complessivo dei cluster delle anomalie.

Tabella 6: Descrizione delle aree climatiche omogenee per macroregione (COSMO RCP8.5).

Macroregioni climatiche omogenee	Descrizione delle aree climatiche omogenee principali che ricadono nelle macroregioni considerando lo scenario RCP8.5
1	<i>Aree climatiche omogenee: 1B, 1C e 1E.</i> <i>Anomalie principali:</i> Nella parte dell'area che ricade in Toscana si assiste ad un aumento complessivo dei fenomeni di precipitazione e degli estremi. Le restanti aree sono interessate da una riduzione delle precipitazioni estive ed aumento di quelle invernali. In generale si ha una riduzione dei <i>frost days</i> , più rilevante rispetto all'RCP4.5.
2	<i>Aree climatiche omogenee: 2C, 2D, 2E.</i> <i>Anomalie principali:</i> per quanto riguarda la pianura Padana si assiste ad una riduzione delle precipitazioni estive e ad un aumento rilevante di quelle invernali; le restanti aree della macroregione 2 sono caratterizzate da un aumento complessivo dei fenomeni di precipitazione anche estremi. In generale si ha un aumento significativo dei <i>summer days</i> , come per lo scenario RCP4.5.
3	<i>Aree climatiche omogenee: 3B, 3C, 3D.</i> <i>Anomalie principali:</i> per tutta la macroregione 3 si osserva una riduzione significativa dei <i>frost days</i> (maggiore rispetto all'RCP4.5). Per l'Appennino centro-meridionale si ha in generale una riduzione delle precipitazioni estive, mentre per le aree più esterne si assiste ad un aumento delle precipitazioni estive e dei fenomeni di precipitazione estremi.
4	<i>Aree climatiche omogenee: 4A.</i> <i>Anomalie principali:</i> si osserva una riduzione delle precipitazioni estive e un aumento di quelle invernali. Inoltre si ha una riduzione generale sia dei <i>frost days</i> che della copertura nevosa, come per lo scenario RCP4.5.
5	<i>Aree climatiche omogenee: 5A.</i> <i>Anomalie principali:</i> la macroregione 5, caratterizzata in base al periodo di riferimento dai valori più significativi di precipitazione, risulta caratterizzata da un aumento delle precipitazioni invernali e da una riduzione delle precipitazioni estive.
6	<i>Aree climatiche omogenee: 6C, 6D.</i> <i>Anomalie principali:</i> si osserva un aumento significativo degli eventi estremi e in generale delle precipitazioni estive, in opposizione a quanto osservato per lo scenario RCP4.5.

CONCLUSIONI

L'analisi del clima attuale e futuro è partita dalla caratterizzazione climatica delle aree terrestri del territorio nazionale nel periodo di riferimento 1981-2010. La caratterizzazione si è basata su un set di 7 indicatori climatici (Tabella 1) selezionati tra quelli presentati nell'ESPON CLIMATE project e che rappresentano i principali impatti meteo-indotti, a scala europea, su ambiente naturale, costruito, patrimonio culturale, sfera sociale ed economica (si veda a tal proposito la Tabella 2.2 in Schmidt-Thomé

and Greiving 2013). Si noti che sono state applicate alcune modifiche agli indicatori selezionati all'interno del lavoro europeo di Schmidt-Thomé and Greiving (2013) per tener conto delle specificità del territorio italiano. Tali modifiche sono riportate di seguito:

- la soglia dell'indicatore summer days è incrementata dal valore di 25°C a 29.2°C, pari al 95° percentile medio della distribuzione delle temperature massime calcolate tramite il set di dati osservati E-OBS (Haylock et al. 2008) per il periodo 1981-2010;
- In aggiunta all'indicatore R20, che restituisce una misura della frequenza delle precipitazioni intense (>20mm/giorno), si è considerato il 95° percentile della distribuzione delle precipitazioni giornaliere (R95p) come stima di "magnitudo" degli eventi;
- Si è aggiunto l'indicatore CDD, che rappresenta il numero massimo di giorni consecutivi all'anno con assenza di pioggia (<1 mm/giorno).

Un'analisi di cluster, a partire dal set di indicatori selezionati, ha permesso di individuare le seguenti 6 macroregioni climatiche omogenee del territorio nazionale:

- Prealpi e Appennino Settentrionale
- Pianura padana, alto versante adriatico e aree costiere dell'Italia centro-meridionale
- Appennino centro-meridionale
- Aree alpine
- Italia centro-settentrionale
- Aree insulari ed estremo sud Italia

La macroregione denominata Italia centro-settentrionale ha una distribuzione geografica più variegata ma di fatto identifica le aree geografiche notoriamente più piovose.

L'analisi delle proiezioni climatiche future per il medio e lungo periodo è stata effettuata utilizzando il modello COSMO-CLM sull'Italia alla risoluzione di circa 8 km considerando gli scenari RCP4.5 e RCP8.5. Tali analisi evidenziano un generale aumento delle temperature per entrambi gli scenari, più marcato nell'RCP8.5, con un incremento fino a 2 °C sul periodo 2021-2050. Per questo stesso periodo, per quanto riguarda la precipitazione, invece, lo scenario RCP4.5 proietta una generale riduzione in primavera ed un calo più accentuato in estate, soprattutto nel sud Italia e in Sardegna (fino al 60%). L'inverno, invece, è caratterizzato da una lieve riduzione di precipitazione che interessa le Alpi e il sud Italia ed un leggero aumento in Sardegna e nella Pianura Padana. Infine in autunno si osserva un generale lieve aumento delle precipitazioni, ad eccezione della Puglia. Lo scenario RCP8.5, invece, proietta un aumento delle precipitazioni invernali ed autunnali sul nord Italia e una lieve riduzione al sud. Le precipitazioni primaverili presentano una diminuzione sul sud Italia, mentre l'estate è caratterizzata da un accentuato aumento delle precipitazioni in Puglia (oltre il 60%) ed una riduzione altrove.

La zonazione delle anomalie climatiche sul medio periodo (2021-2050), rispetto al periodo di riferimento per gli indicatori selezionati. Tale analisi ha permesso di individuare 5 cluster di anomalia climatica. Dalla sovrapposizione tra le 6 macroregioni climatiche omogenee (definite sul periodo di riferimento) e i 5 cluster delle anomalie sono quindi state individuate le aree climatiche omogenee descritte in Tabella 5 e Tabella 6, rispettivamente per lo scenario RCP4.5 e RCP8.5.

Tale analisi, insieme ad altre più mirate e locali, è stata utilizzata come strumento di supporto e sintesi per le trattazioni dei capitoli settoriali.

Box 1 Cluster analysis

La cluster analysis è una tecnica di analisi multivariata attraverso la quale è possibile classificare i dati in cluster (o gruppi) in modo tale che elementi dello stesso gruppo siano più simili tra loro che non agli elementi appartenenti ad altri gruppi. Le tecniche di clustering si distinguono in clustering gerarchico e in clustering partizionale (Mooi and Sarstedt 2011); nel primo caso, è costruita una gerarchia di partizioni con un numero (de)crecente di gruppi; i risultati del processo sono rappresentati tipicamente tramite dendrogramma che permette di identificare i successivi accorpamenti e suddivisioni del campione. Per quanto riguarda il clustering partizionale, esso mira a fornire come risultato finale una sola partizione delle osservazioni; inoltre, l'appartenenza ad una classe è definita tramite una misura di distanza dal punto rappresentativo del cluster (centroide, mediodo).

La cluster analysis applicata in questa attività utilizza in sequenza i due approcci sopra menzionati: l'approccio gerarchico, definito come metodo di Ward (Ward 1963), è utilizzato come inizializzazione del metodo partizionale k-means (MacQueen 1967; Peterson 2011). Tale procedura permette di avere al passo iniziale una suddivisione delle classi non casuale e/o arbitraria. Il metodo Ward, nello specifico, si propone di realizzare una classificazione gerarchica tramite la minimizzazione della varianza delle variabili entro ciascun gruppo. Ad ogni passo vengono fusi i gruppi che presentano la minima variazione della varianza entro i gruppi (Ward 1963). L'algoritmo k-means segue, invece, una procedura iterativa che ha come obiettivo quello di minimizzare una particolare "funzione di costo" ossia la varianza totale intra-cluster. Ogni cluster viene identificato mediante un centroide o punto medio. Ad ogni iterazione, l'algoritmo costruisce una nuova partizione associando ogni osservazione di partenza al cluster il cui centroide è più vicino ad esso per poi ricalcolare i centroidi dei nuovi cluster individuati, finché l'algoritmo non converge o raggiunge il numero massimo di iterazioni scelto. In tal caso, i passi eseguiti possono essere riassunti nei seguenti punti (Hartigan and Wong 1979):

1. Inizializzazione: calcolo dei valori iniziali dei centroidi dei cluster applicando il metodo Ward al set di dati di partenza, che possono essere, nel caso in esame, indicatori (per la zonazione climatica di riferimento) o anomalie (per la zonazione climatica delle anomalie) (Peterson et al. 2010).
 2. Clustering: calcolo dei K cluster a partire dai dati di partenza in modo tale da minimizzare la funzione obiettivo (Schmidt-Thomé and Greiving 2013).
 3. Aggiornamento dei centroidi dei nuovi cluster individuati nel passo precedente.
- Si ripetono i passi 2 e 3 finché l'algoritmo non converge; inoltre, l'algoritmo si arresta se viene raggiunto il numero massimo di iterazioni scelto.

Il metodo k-means è vantaggioso in termini di onere computazionale qualora si debbano caratterizzare aree di vaste dimensioni ma presenta come vincolo la necessità di conoscere a priori il numero di classi K. Per identificare il numero ottimale di cluster, si possono applicare diversi metodi di interpretazione e validazione della consistenza dei dati all'interno dei cluster con l'obiettivo di fornire una misura della coesione interna tra gli elementi del cluster (compattezza) ed una misura della separazione tra un cluster e gli altri (isolamento).

Nel presente lavoro, sono stati utilizzati i seguenti indici:

- *Indice di Silhouette*: valuta sia la distanza media di ciascun punto dagli altri punti del cluster di appartenenza che la distanza media dai punti del cluster più vicino; maggiore è valore medio di tale indice più alta è la consistenza dell'analisi per il numero K di classi corrispondente (Kaufman and Rousseeuw 1990);
- *Indice di Calinski-Harabasz o Variance Ratio*: stima il rapporto tra la devianza tra i cluster e quella interna agli stessi; il numero ottimale di cluster è determinato dai massimi di tale indice (Calinski and Harabasz 1974);
- *Indice di Davies-Bouldin*: rappresenta una misura della compattezza e dell'isolamento dei cluster; il numero ottimale di classi K, in questo caso, è individuato dal minimo di tale indice (Davies and Bouldin 1979)

Prima di effettuare la cluster analysis, è stata realizzata una pre-elaborazione delle variabili impiegate (Schmidt-Thomé and Greiving 2013) che consiste nei seguenti passi:

1. *Winsorization*: rimozione degli outlier che si discostano notevolmente dai valori centrali della distribuzione delle variabili. Le variabili minori del valore del percentile 0.1% sono sostituite con tale percentile mentre le variabili maggiori del 99.9% sono sostituite con il valore del percentile 99.9%.
2. *Standardizzazione*: a valle della winsorization, il set di dati è standardizzato nell'intervallo [0,1] in modo da uniformare i valori delle variabili con differenti unità di misura (Milligan and Cooper 1988).

Determinazione del numero di cluster

Per determinare un numero consistente di cluster, sono stati usati gli indici introdotti nella *Metodologia* (indici di *Silhouette*, di *Calinski Harabasz* e *David-Bouldin*). Dal confronto delle varie analisi (Figura 17), tali indici non hanno individuato chiaramente un numero ottimale ma un range compreso tra 5 e 6. Per tali motivi, in analogia con la zonazione climatica comunemente adottata per scopi energetici (DPR n. 412 /1993) e, nel tentativo di identificare un numero di classi che rappresentasse un equo *trade off* tra consistenza e complessità del territorio, si è scelto di adottare un numero di cluster pari a 6.

La metodologia di *cluster analysis* è stata utilizzata per realizzare sia la zonazione climatica (che riguarda il periodo di riferimento climatico (1981-2010) basata su dati osservati) sia la zonazione delle anomalie climatiche (basata sulle variazioni climatiche stimate dai modelli climatici regionali ad alta risoluzione).

La prima zonazione tende a raggruppare macroregioni che, attualmente, si presentano simili dal punto di vista del clima osservato, mentre la seconda mira ad individuare le aree che potrebbero essere esposte a simili variazioni in riferimento ad alcuni specifici indicatori climatici. Entrambe le zonazioni hanno lo scopo di supportare la successiva analisi multisettoriale sugli impatti; a tal fine esse si basano su degli indicatori disponibili e ritenuti più rilevanti in riferimento agli impatti selezionati nel presente documento.

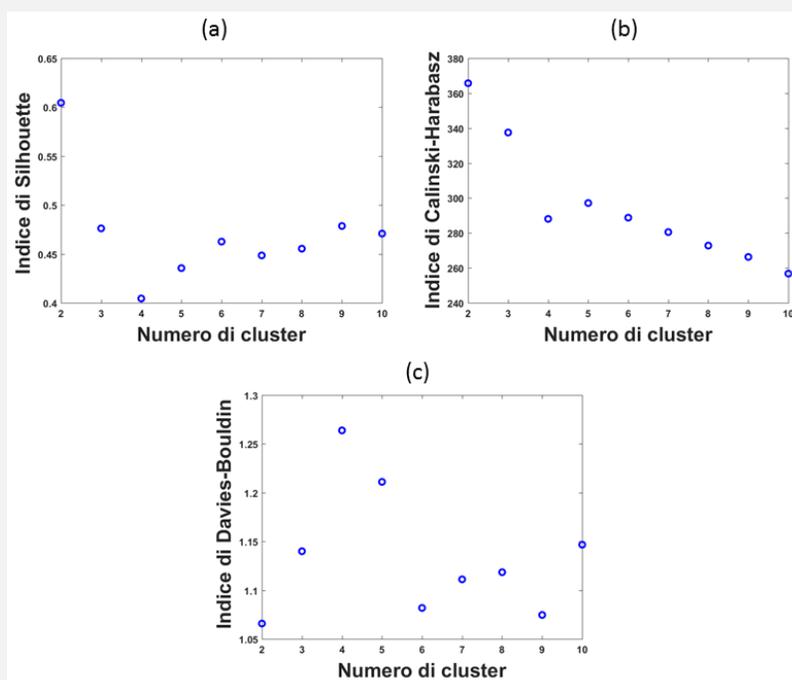


Figura 17: (a) Indice di Silhouette, (b) Indice di Calinski-Harabasz, (c) Indice di Davies-Bouldin

Box 2 Scenari e modelli climatici

La simulazione climatica utilizzata nel presente lavoro, si basa sui seguenti elementi:

- 1) *Representative Concentration Pathways* (RCPs) rappresentano percorsi alternativi (traiettorie nel tempo) dei livelli di forcing radiativo (o concentrazioni di CO-equivalente) consistenti con diverse ipotesi sulla crescita economica globale, variazione della popolazione, sfruttamento delle risorse energetiche ed altri fattori socio economici. In particolare, l'IPCC ne ha selezionati quattro al fine di poter disporre di scenari standard che permettano la comparazione dei risultati tra proiezioni (van Vuuren et al. 2011). Di questi quattro nel presente lavoro ne sono considerati due: lo scenario RCP4.5, che rappresenta uno scenario intermedio o di stabilizzazione delle emissioni e lo scenario RCP8.5 che prevede un incremento costante delle emissioni fino al 2100; il suffisso numerico rappresenta essenzialmente l'incremento del forcing radiativo stimato al 2100 rispetto all'era preindustriale (1765) in funzione delle concentrazioni e variazioni ipotizzate; al 2011, tale valore è circa pari a 2.29 W/m^2 .
- 2) Le stime di emissioni così ottenute sono utilizzate come forzanti per i modelli climatici globali (GCM) che permettono la rappresentazione dei principali processi atmosferici a scala globale; numerosi studi (Breugem et al. 2007; IPCC 2013a) hanno mostrato come essi siano in grado di riprodurre il clima globale e la risposta alla variazione di GHG (Green House Gases) con affidabilità maggiori per alcune variabili (temperatura) ed inferiore per altre; d'altronde, nonostante i notevoli sviluppi degli ultimi anni, le risoluzioni orizzontali all'oggi permesse a causa degli elevati oneri computazionali si attestano nell'ordine del centinaio di chilometri; a causa di tale vincolo, tali modelli sono quindi inadeguati per stime di tendenze e impatti a scala locale/regionale per le quali assumono importanza cruciale (anche rispetto alla circolazione di larga scala) le caratteristiche geografiche del territorio (distanza dal mare, orografia).
- 3) Per sopperire alle limitazioni degli attuali modelli GCM, sono state quindi sviluppate tecniche di "regionalizzazione" differenti per approccio, oneri computazionali, prerequisiti e limiti. Fondamentalmente si riconoscono metodi di regionalizzazione "statistica" e "dinamica". I primi adottano schemi empirici sulla base di relazioni statistiche tra "predittori" a larga scala e variabili climatiche locali, calibrate e validate su dati osservati e successivamente applicate alle variabili dei GCM; richiedono limitato onere computazionale e permettono analisi anche alla scala del punto stazione ma necessitano di lunghe serie di dati osservati per la definizione delle relazioni statistiche. I secondi prevedono l'uso di modelli climatici ad area limitata e a maggiore risoluzione (*Regional Climate Model* RCM) innestati per l'area di interesse sul modello globale dal quale traggono le condizioni al contorno (Figura 18); le risoluzioni all'oggi correntemente adottate, nell'ordine dei 10 km, permettono da un lato una migliore risoluzione dell'orografia e dall'altro di risolvere una frazione cospicua dei fenomeni atmosferici locali, sebbene permangano ancora degli errori (anche in tal caso maggiore affidabilità per le temperature, minore per le precipitazioni).

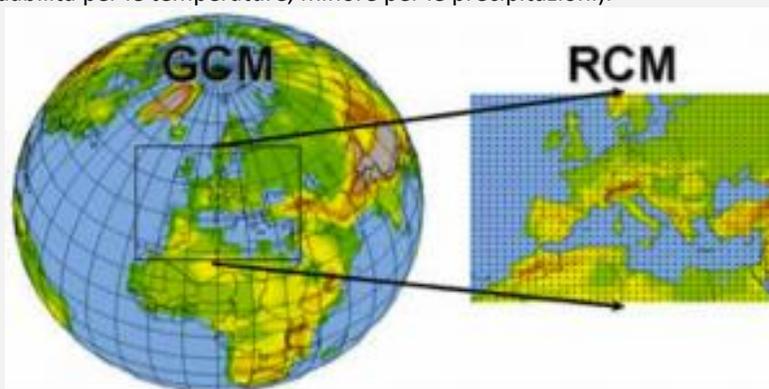


Figura 18: Rappresentazione schematica dell'approccio utilizzato nel downscaling dinamico. (Immagine tratta da (Giorgi, 2008).)

Il modello COSMO CLM può essere utilizzato per effettuare simulazioni climatiche con risoluzioni spaziali comprese nell'intervallo tra 1 e 50 km, sebbene la formulazione non idrostatica delle equazioni che regolano la

dinamica lo renda maggiormente adatto per effettuare simulazioni che utilizzano griglie con risoluzioni orizzontali inferiori a 20 km (Bohm et al. 2006).

La formulazione matematica del modello COSMO LM è basata sulle equazioni di Navier-Stokes per un fluido compressibile. L'atmosfera è trattata come un fluido multifase (composto da aria secca, vapore acqueo e acqua allo stato liquido e solido) per cui vale l'equazione dei gas perfetti, soggetto alla forza di gravità e a quella di Coriolis.

Il modello numerico, inoltre, comprende diverse parametrizzazioni, che consentono di tenere conto, almeno in maniera statistica, dell'effetto di diversi fenomeni che avvengono su scale spaziali maggiori rispetto a quelle che il modello riesce a risolvere esplicitamente, ma che hanno effetti significativi sulle scale d'interesse meteorologiche (un esempio di tali fenomeni è l'interazione dei flussi atmosferici con l'orografia). In particolare le principali parametrizzazioni incluse nel modello sono:

- Turbolenza su scala sub griglia
- Strato superficiale
- Nubi e precipitazione su scala di griglia
- Nubi su scala sub griglia
- Convezione umida
- Convezione superficiale
- Radiazione
- Modello di suolo
- Dati di terreno e superficie

Informazioni aggiuntive sulle caratteristiche del modello sono disponibili sul sito del consorzio europeo CLM Assembly che ne cura lo sviluppo.

Box 3 Matrici di correlazione delle anomalie e determinazione del numero di cluster per la zonazione futura.

Le matrici di correlazione delle anomalie vengono riportate per lo scenario RCP4.5 nella Tabella 7 mentre per lo scenario RCP8.5 nella Tabella 8. Per entrambi gli scenari, non si evince una correlazione significativa tra le anomalie considerate per la zonazione climatica; dunque non è presente informazione ridondante.

Tabella 7: Matrice di correlazione delle anomalie (COSMO RCP4.5 2021-2050 vs 1981-2010).

	Tmean	R20	FD	SU95p	WP	SP	SC	Evap	R95p
Tmean	1	-0.17	-0.39	0.36	-0.06	-0.37	-0.21	-0.46	-0.01
R20	-0.17	1	0.52	0.53	0.60	-0.14	0.65	0.01	0.64
FD	-0.39	0.52	1	0.37	0.37	-0.08	0.78	0.11	0.46
SU95p	0.36	0.53	0.37	1	0.44	-0.28	0.66	-0.50	0.37
WP	-0.06	0.60	0.37	0.44	1	-0.18	0.5	0.01	0.53
SP	-0.37	-0.14	-0.08	-0.28	-0.18	1	-0.17	0.07	-0.32
SC	-0.21	0.65	0.78	0.66	0.5	-0.17	1	-0.19	0.47
Evap	-0.46	0.01	0.11	-0.50	0.01	0.07	-0.19	1	0.14
R95p	-0.01	0.64	0.46	0.37	0.53	-0.32	0.47	0.14	1

Tabella 8: matrice di correlazione delle anomalie (COSMO RCP8.5 2021-2050 vs 1981-2010)

	Tmean	R20	FD	SU95p	WP	SP	SC	Evap	R95p
Tmean	1	-0.22	-0.43	0.43	-0.05	-0.11	-0.23	-0.18	-0.07
R20	-0.22	1	-0.17	-0.22	0.64	-0.13	-0.08	0.43	0.32
FD	-0.43	-0.17	1	0.25	-0.34	0.43	0.71	-0.48	0.17
SU95p	0.43	-0.22	0.25	1	-0.16	0.13	0.62	-0.36	0.21
WP	-0.05	0.64	-0.34	-0.16	1	-0.25	-0.19	0.54	0.26
SP	-0.11	-0.13	0.43	0.13	-0.25	1	0.31	-0.21	0.14
SC	-0.23	-0.08	0.71	0.62	-0.19	0.31	1	-0.37	0.27
Evap	-0.18	0.43	-0.48	-0.36	0.54	-0.21	-0.37	1	0.10
R95p	-0.07	0.32	0.17	0.21	0.26	0.14	0.27	0.10	1

Per determinare un numero consistente di cluster, sono stati valutati gli indici introdotti nella Metodologia. Per entrambi gli scenari RCP4.5 e RCP8.5, sono stati individuati cinque *cluster* per la zonazione climatica delle anomalie (i risultati dell'applicazione dei metodi di validazione sono mostrati in Figura 19).

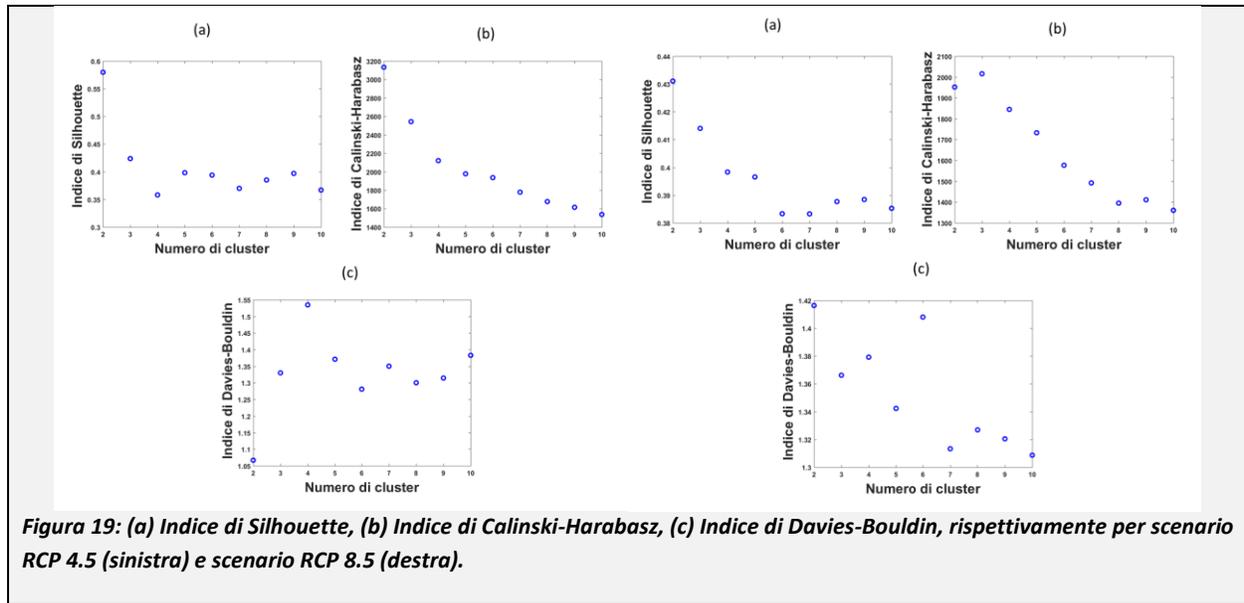


Figura 19: (a) Indice di Silhouette, (b) Indice di Calinski-Harabasz, (c) Indice di Davies-Bouldin, rispettivamente per scenario RCP 4.5 (sinistra) e scenario RCP 8.5 (destra).

AREE MARINE/COSTIERE

La presente sezione si propone come obiettivo la caratterizzazione delle aree marine del territorio nazionale, per il periodo di riferimento e con le proiezioni climatiche future, al fine di supportare l'analisi multisettoriale degli impatti derivanti. A differenza della zonazione climatica su aree terrestri, non è stato possibile reperire nella letteratura scientifica una metodologia *ad hoc* consolidata per quanto riguarda l'individuazione di aree omogenee marine. Pertanto, la stessa metodologia di *cluster analysis* utilizzata per le aree terrestri è stata applicata alle variabili fisiche disponibili per le aree marine, previa verifica della fattibilità dell'uso di tale approccio. Anche in questo caso l'analisi è finalizzata ad individuare aree del Mar Mediterraneo che potrebbero essere esposte a variazioni climatiche simili in riferimento agli specifici indicatori.

Come per le aree terrestri, si è proceduto attraverso i seguenti passaggi:

Individuazione delle “macroregioni climaticamente omogenee” con condizioni climatiche simili per il periodo di riferimento (1987-2010) (zonazione climatica), attraverso la metodologia della *cluster analysis*, utilizzando le rianalisi dei servizi marini Copernicus di seguito identificate con REAN;

Analisi delle anomalie climatiche attese sulla base delle proiezioni climatiche future (2021-2050) per lo scenario climatico RCP8.5, ottenute tramite il modello oceanico NEMO (<https://www.nemo-ocean.eu>) applicato al Mar Mediterraneo (Lovato et al. 2013), di seguito identificate con MEDSEA;

Zonazione delle anomalie climatiche future sulla base delle variazioni climatiche attese per il periodo 2021-2050 (RCP 8.5);

Individuazione delle “aree climatiche omogenee”, attraverso la sovrapposizione delle macroregioni climatiche omogenee e della zonazione delle anomalie, per definire aree con uguale condizione climatica attuale e stessa proiezione climatica di anomalia futura.

In base alla letteratura scientifica e alla disponibilità di dati osservati e modellistici sono state identificate tre variabili primarie per descrivere l'impatto dell'evoluzione del clima sui mari italiani: la temperatura superficiale dell'acqua, il livello del mare e l'acidità dell'acqua. Si è inoltre proceduto anche all'analisi dell'indicatore di rimescolamento poiché rappresentativo del ciclo di stratificazione/destratificazione della colonna d'acqua e quindi rilevante per gli ecosistemi marini. Il livello del mare prodotto dal modello forzato e dalle rianalisi deve essere opportunamente trattato per includere non solo l'evoluzione della superficie libera del mare, riferita come componente di massa degli oceani, ma anche l'effetto di espansione e contrazione del volume dovuto ai cambiamenti di temperatura e salinità delle masse oceaniche. Il livello del mare presentato nei paragrafi successivi tiene conto dell'effetto cumulativo di queste tre componenti.

ZONAZIONE CLIMATICA SUL PERIODO DI RIFERIMENTO

Nel presente studio sono stati utilizzati i prodotti delle rianalisi che fanno parte dei servizi marini messi a disposizione dal servizio Europeo CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service) (<http://marine.copernicus.eu>), qui identificate con REAN. Tali rianalisi sono ottenute tramite l'integrazione di modelli numerici e l'assimilazione di osservazioni multiplatforma e rappresentano lo stato dell'arte per la caratterizzazione delle condizioni meteo-climatiche del mare. I dati disponibili per il

Mar Mediterraneo si riferiscono al periodo 1987-2014 ed hanno una risoluzione orizzontale di circa 7 km. Sono descritti nel documento di CMEMS chiamato Product User Manual (PUM)⁶ e nel QQuality Information Document (QUID)⁷.

Le mappe della climatologia degli indicatori SST e SSH vengono riportate in Figura 20. Come indicato dalle distribuzioni di frequenza (Figura 20), considerando il Mediterraneo centrale, la temperatura superficiale riporta una variabilità di circa 4 °C mentre il livello del mare mostra una variabilità di circa 30 cm. Inoltre, tali indicatori sono caratterizzati da una correlazione moderata (coefficiente di correlazione = 0.69).

L'analisi relativa al rimescolamento della colonna d'acqua (Gaspar et al. 1990; Moum and Smyth 2001) è importante poiché il rimescolamento è connesso con l'ossigenazione della colonna d'acqua che avviene attraverso gli scambi gassosi all'interfaccia aria-mare e rappresenta un indicatore di salute degli ecosistemi marini per le aree costiere e di piattaforma continentale dei mari Europei, incluso anche dalla *Marine Strategy Framework Directive* (MSFD, Directive 2008/56/EC). Bassi livelli di rimescolamento permettono a processi quali l'eutrofizzazione di portare nella colonna d'acqua a bassi livelli di ossigeno e addirittura a condizioni anossiche con impatti negativi sulla salute degli ecosistemi e sulla loro produttività. La definizione dell'indicatore di rimescolamento della colonna d'acqua si basa sulla pubblicazione Fratianni et al. 2016 e tale indicatore viene calcolato sui primi 100 metri della colonna d'acqua (Figura 21).

⁶PUM for Mediterranean Sea physical reanalysis product MEDSEA_REANALYSIS_PHYS_006_004, Release 1.1, pp. 24. <http://marine.copernicus.eu/documents/PUM/CMEMS-MED-PUM-006-004.pdf>

⁷ QUID for Mediterranean Sea physical reanalysis product MEDSEA_REANALYSIS_PHYS_006_004, Release 1.1, pp. 24. <http://marine.copernicus.eu/documents/QUID/CMEMS-MED-QUID-006-004.pdf>

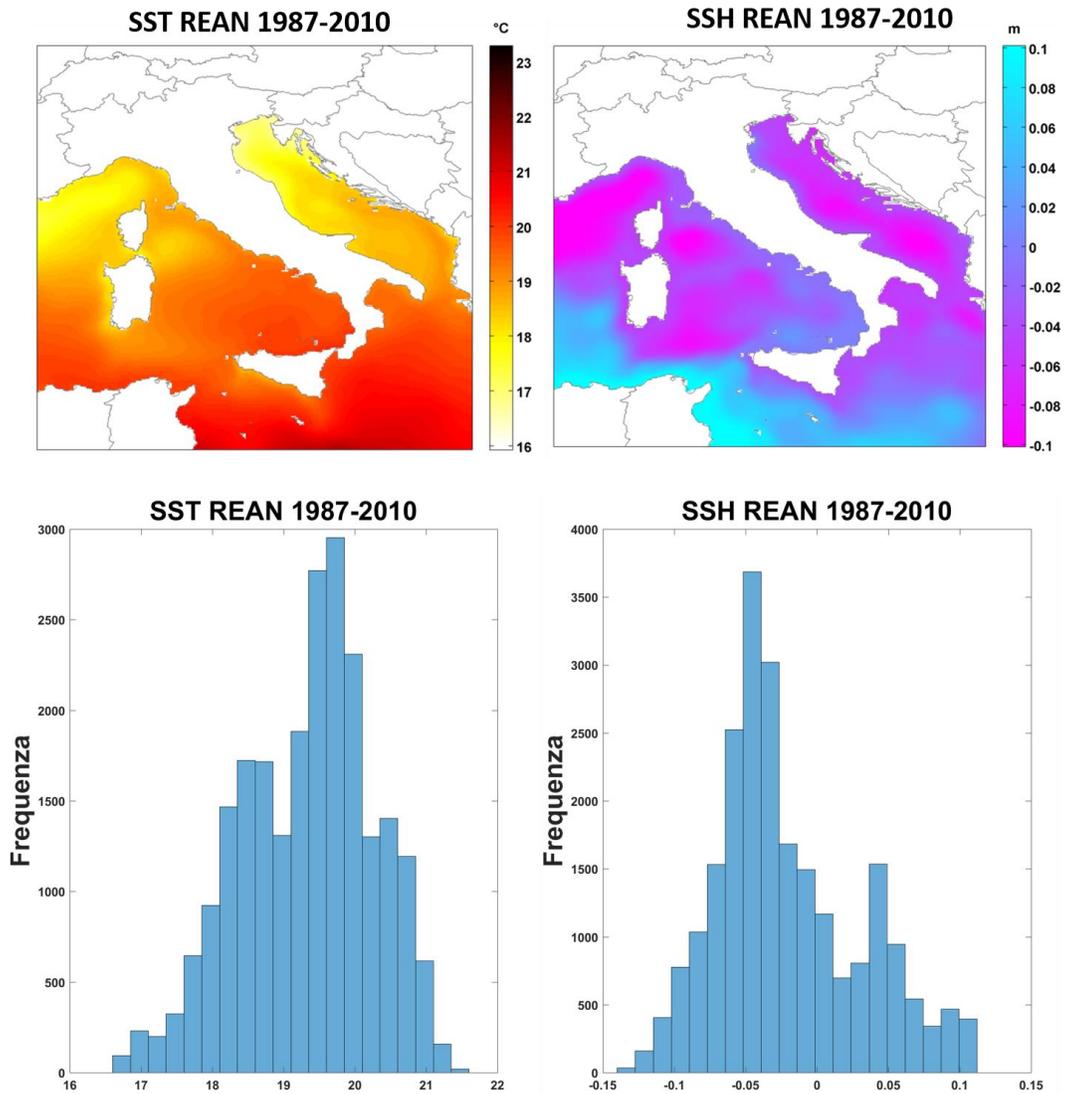


Figura 20: Climatologie (pannelli superiori) e distribuzioni di frequenza (pannelli inferiori) degli indicatori SST e SSH sul Mediterraneo centrale (REAN 1987-2010).

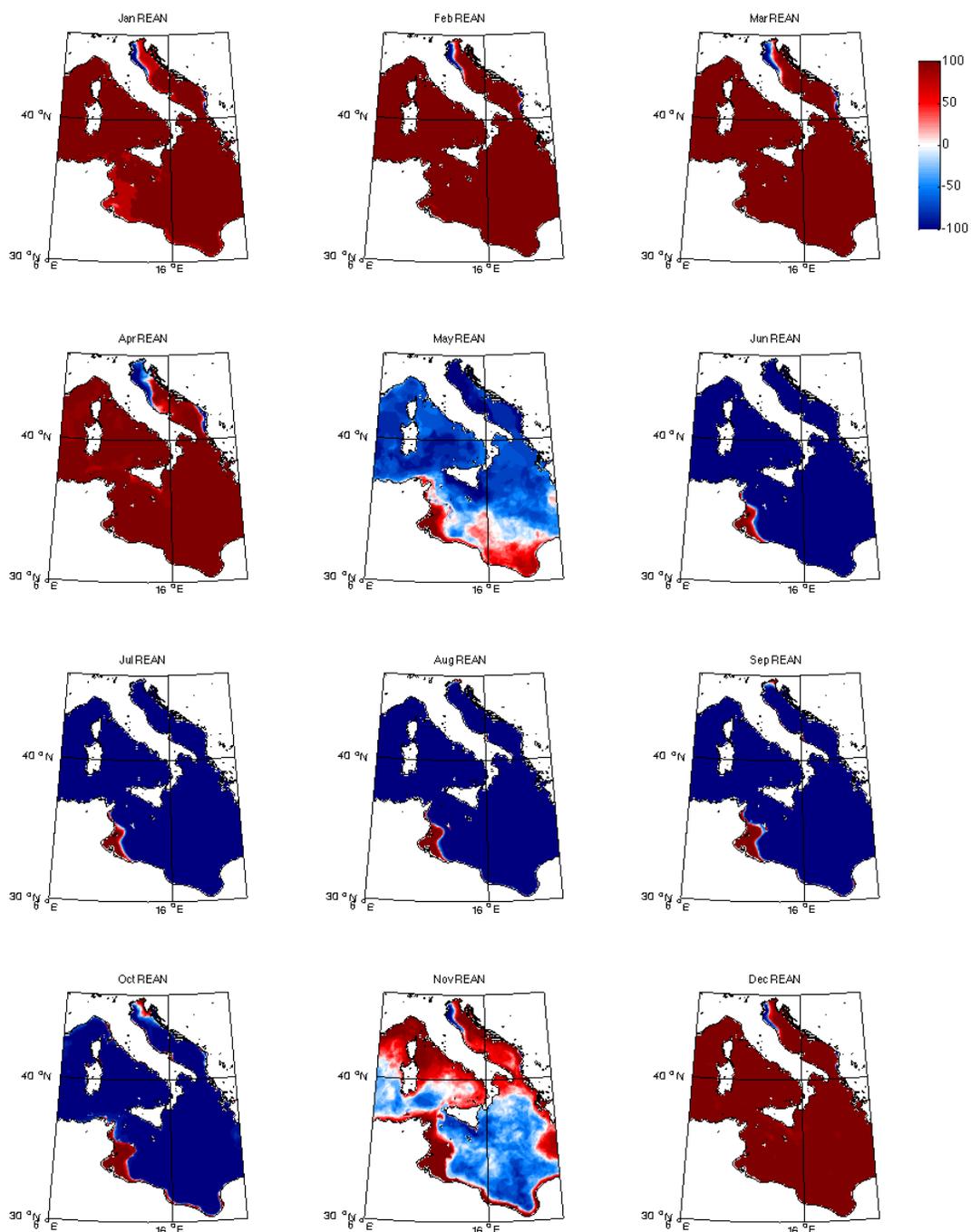


Figura 21: Mappe mensili dell'indicatore di rimescolamento proposto in Fratianni et al. 2016. Il dataset considerato è REAN rilasciato da CMEMS; le analisi sono state eseguite su medie mensili per il periodo 1987-2010.

Con l'obiettivo di verificare la consistenza spazio-temporale tra le rianalisi disponibili in Copernicus per l'intero bacino del Mar Mediterraneo (REAN, che sono state utilizzate per l'individuazione delle "macroregioni climaticamente omogenee") e il clima attuale riprodotto nella simulazione climatica del CMCC (modello oceanico NEMO, configurato come in Lovato et al. 2013 da cui è derivato il dataset fisico MEDSEA, utilizzato anche per l'analisi delle anomalie climatiche attese e la loro zonazione), sono state

ANALISI DELLA CONDIZIONE CLIMATICA ATTUALE E
FUTURA

considerate la differenza nella distribuzione spaziale e la variabilità stagionale di tali variabili sul periodo 1987-2010 in cui le rianalisi sono disponibili (si veda l'approfondimento nel Box 1. Le analisi hanno rivelato che sia la temperatura superficiale che il livello del mare simulati dal modello presentano differenze molto contenute rispetto ai dati delle rianalisi e consentono di descrivere con buon grado di realismo lo stato dei mari nel periodo climatico di riferimento.

Per quanto riguarda invece l'indicatore di rimescolamento, il confronto fra i due dataset (REAN in e MEDSEA presenta una buona corrispondenza e si nota che solamente nell'area del nord Adriatico la simulazione MEDSEA sovrastima la zona maggiormente stratificata. Tale sovrastima è probabilmente dovuta all'utilizzo di un input fluviale fornito dal modello CMCC-CM a bassa risoluzione spaziale ($\sim 1^\circ$) al modello MEDSEA e, ad esempio, il deflusso del fiume Po è rappresentato come un contributo diffuso su tutto il Nord Adriatico. Nel caso delle rianalisi REAN invece il fiume Po è inserito con una climatologia come sorgente distribuita lungo la costa su 9 punti della griglia del modello oceanografico ad una risoluzione di $1/16^\circ$. Tale differenza fa sì che la colonna d'acqua nella simulazione MEDSEA nel Nord Adriatico risulti maggiormente stratificata per la maggior presenza di acqua dolce in superficie rispetto al dataset REAN in cui il deflusso del Po è concentrato nella fascia costiera.

Box 4: REAN e MEDSEA a confronto

Il confronto tra REAN e MEDSEA è stato condotto per verificare la robustezza del modello del CMCC nel rappresentare le condizioni attuali di temperatura superficiale dell'acqua e livello del mare rispetto alle rianalisi.

Il confronto tra i due dataset, effettuato sul periodo 1987-2010 in cui le rianalisi sono disponibili, per la temperatura superficiale del mare evidenzia una buona corrispondenza per il Mar Ionio e il Mediterraneo orientale, mentre alcune differenze emergono nel bacino occidentale, sebbene i valori siano mediamente al di sotto di 1°C . Tali differenze si concentrano principalmente nel periodo invernale ed autunnale come indicato dall'evoluzione mensile della temperatura per l'intero bacino nel periodo di riferimento.

Il livello del mare prodotto dal modello e dalle rianalisi deve essere opportunamente trattato per includere non solo l'evoluzione della superficie libera del mare, riferita come componente di massa degli oceani, ma anche l'effetto della variazione temporale di temperatura e salinità delle masse oceaniche. Il livello del mare presentato in questo documento tiene conto dell'effetto cumulativo di queste tre componenti.

Le differenze nel livello del mare per il clima attuale indicano la presenza di un *bias* sistematico tra i due dataset, pari a circa 50 cm. Il livello del mare simulato in MEDSEA è imposto in funzione dei dati al contorno ottenuti dal modello ed è ragionevole che questo differisca dai valori osservati. Infatti, il livello del mare nelle simulazioni non viene vincolato a nessun valore di riferimento ma è il prodotto dell'aggiustamento tra la componente atmosferica ed oceanica a livello globale.

E' comunque possibile confrontare la variabilità del livello del mare sottraendo da ciascun dataset il valore medio calcolato per l'intero bacino nel periodo di riferimento. Le climatologie mensili del livello del mare presentano il medesimo ordine di grandezza e vi è una buona corrispondenza nell'evoluzione temporale.

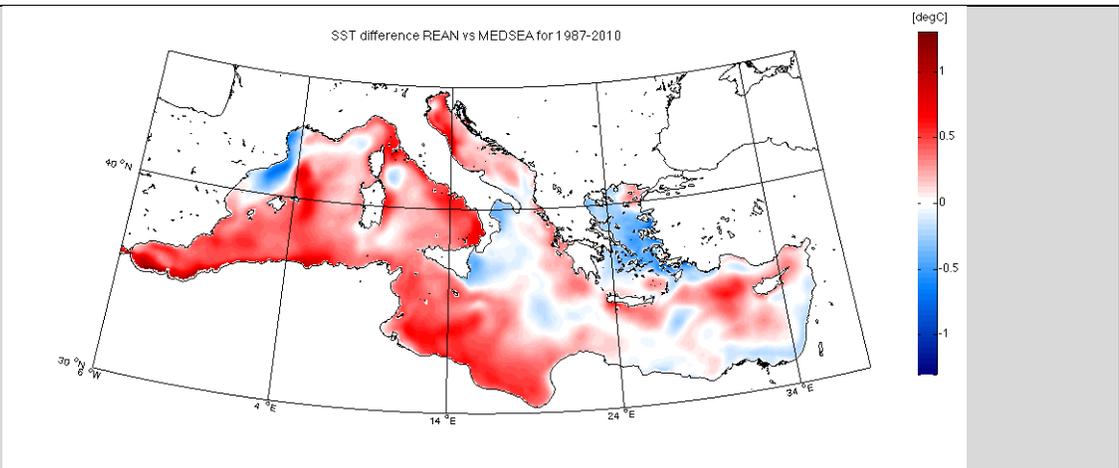


Figura 22: Differenza della temperatura superficiale (°C) media calcolata sul periodo 1987-2010 tra la rianalisi (REAN) e il modello forzato con i dati climatici (MEDSEA).

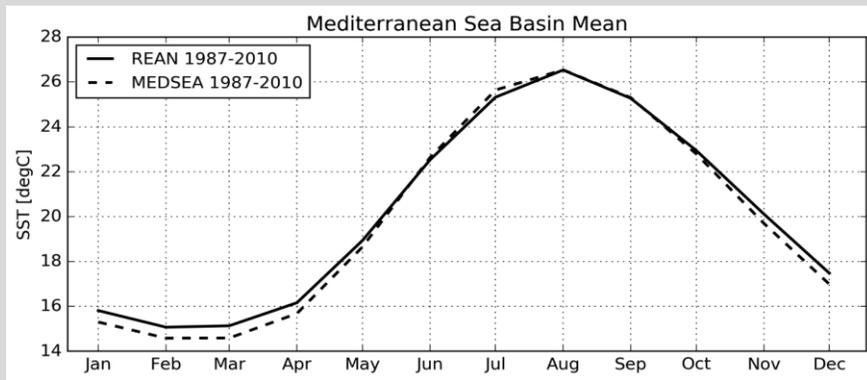


Figura 23: Climatologia mensile della temperatura superficiale dell'acqua (°C) calcolata sul periodo 1987-2010 per la rianalisi (REAN, linea continua) ed per la simulazione con il modello forzato (MEDSEA, linea tratteggiata).

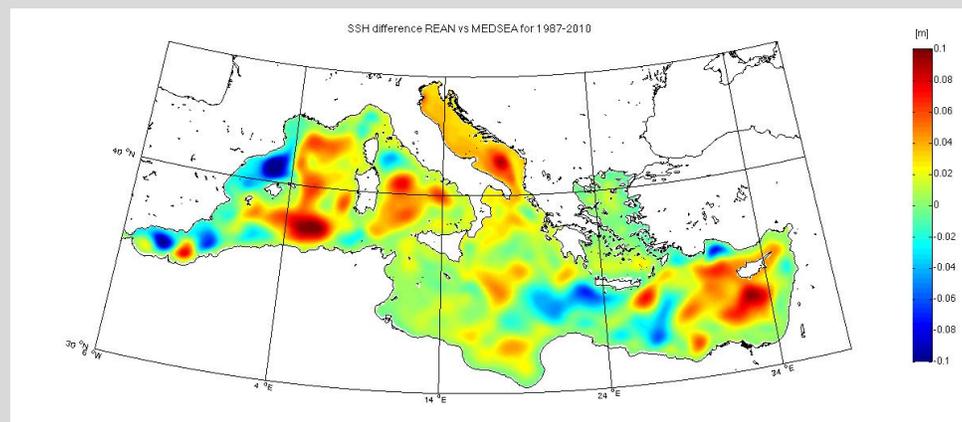


Figura 24: Differenza del livello del mare (metri) medio calcolata sul periodo 1987-2010 tra la rianalisi (REAN) e il modello forzato con i dati climatici (MEDSEA). I dati sono stati corretti rimuovendo il valore medio calcolato sull'intero periodo di ciascun dataset.

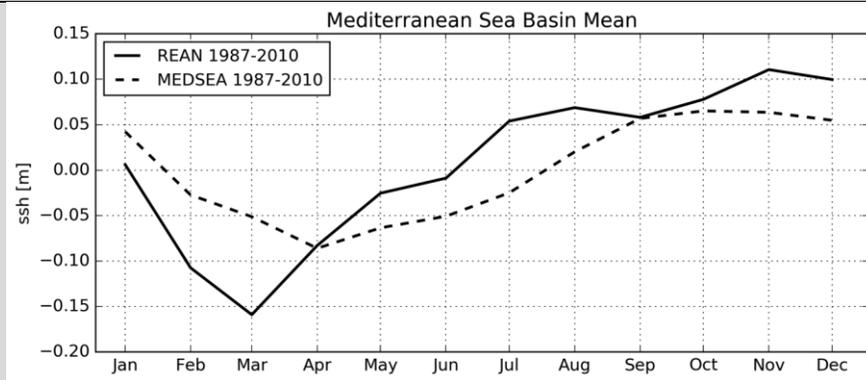
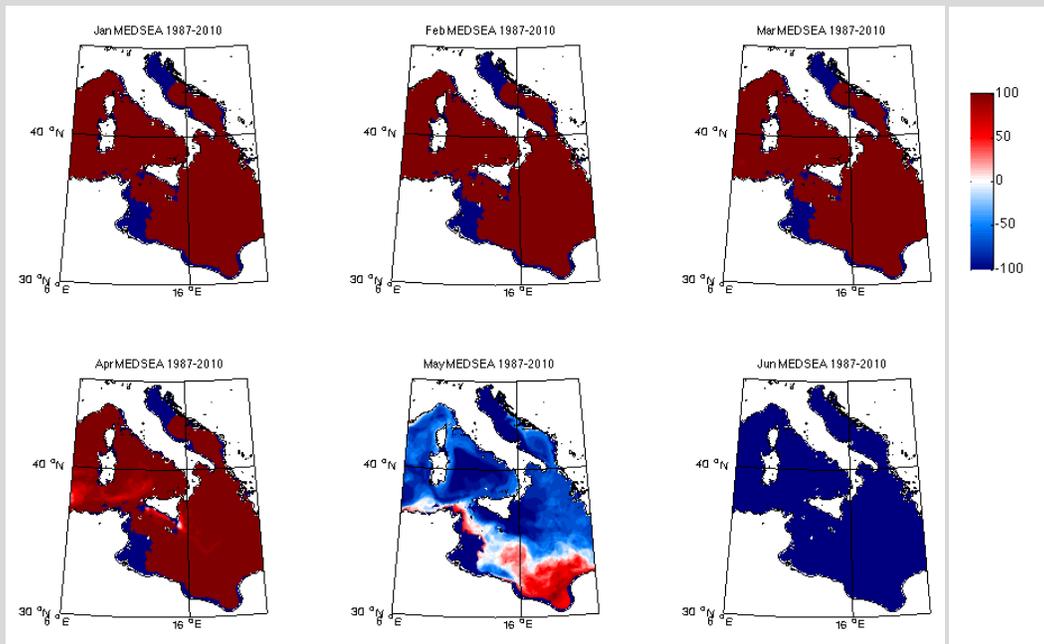


Figura 25: Climatologia mensile del livello del mare (metri) calcolata sul periodo 1987-2010 per la rianalisi (REAN, linea continua) e per la simulazione con il modello forzato (MEDSEA, linea tratteggiata). I dati sono stati corretti rimuovendo il valore medio calcolato sull'intero periodo di ciascun dataset.



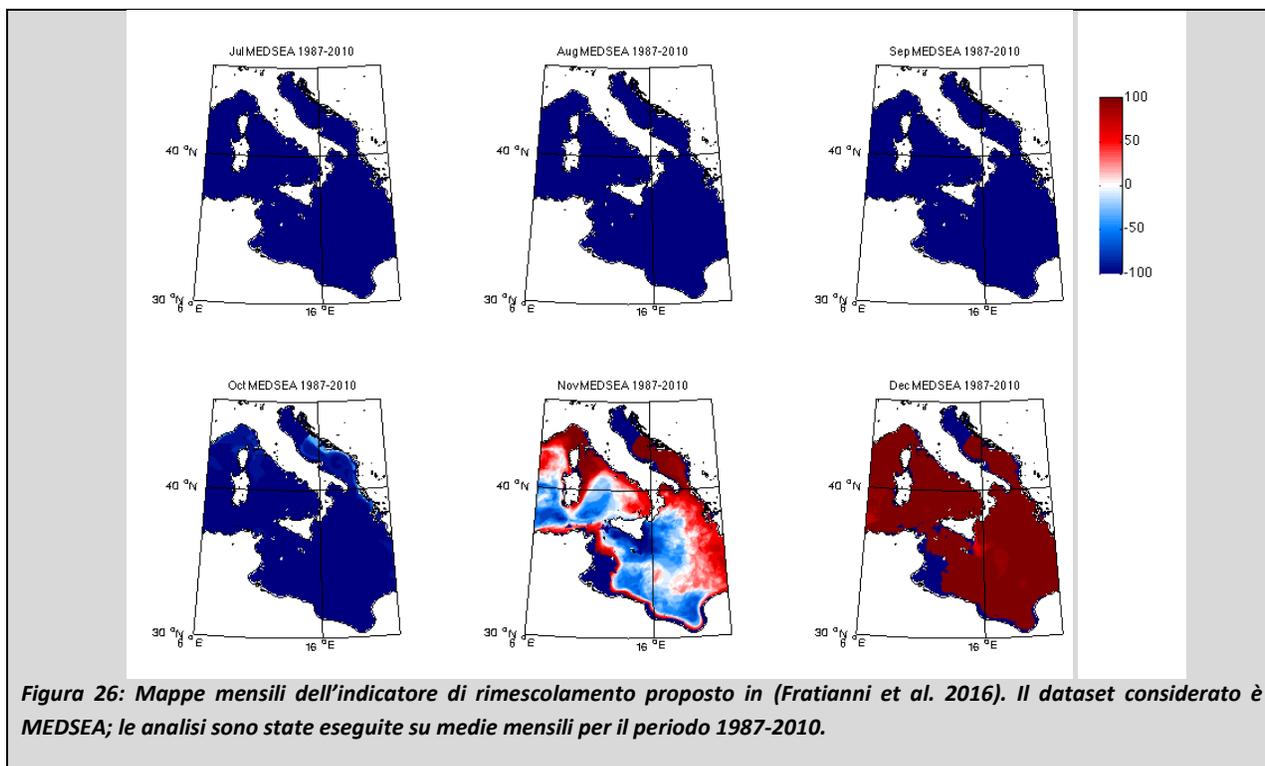


Figura 26: Mappe mensili dell'indicatore di rimescolamento proposto in (Fratanni et al. 2016). Il dataset considerato è MEDSEA; le analisi sono state eseguite su medie mensili per il periodo 1987-2010.

Per l'individuazione delle macroregioni climatiche omogenee marine, tra i tre indicatori riportati precedentemente, sono stati utilizzati solo SST espressa in °C e SSH espresso in metri. Lo strumento impiegato per la realizzazione delle zonazioni sopra citate è la *cluster analysis*, adottata anche per l'analisi delle Aree Terrestri. Maggiori dettagli riguardo tale tecnica sono stati presentati in precedenza nella sezione Aree Terrestri.

Per determinare un numero consistente di cluster, sono stati usati gli indici introdotti nella Metodologia del capitolo Aree Terrestri (indici di *Silhouette*, di *Calinski Harabasz* e *David-Bouldin*). Il confronto dei vari indici (Figura 27) ha permesso di individuare 3 come numero consistente di cluster per la definizione di macroregioni climatiche marine omogenee sul Mediterraneo centrale.

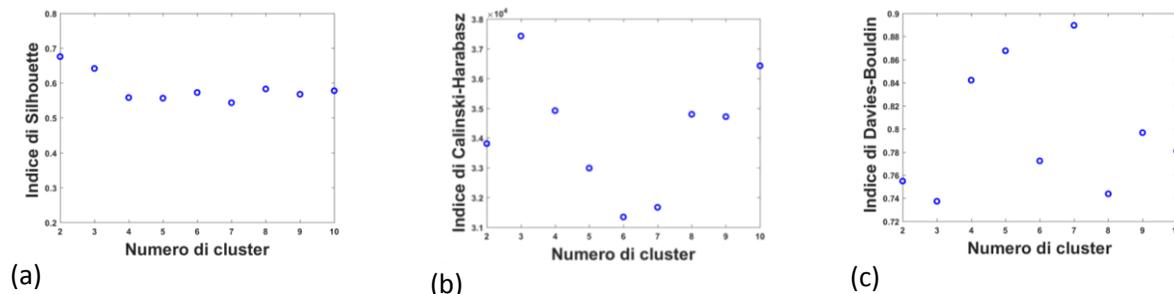


Figura 27: REAN (box Mediterraneo centrale): (a) Indice di Silhouette, (b) Indice di Calinski-Harabasz, (c) Indice di Davies-Bouldin.

In Figura 28 viene mostrata la zonazione climatica marina sul periodo di riferimento disponibile (1987-2010), ottenuta a partire dalle rianalisi REAN. Inoltre, in Figura 28, vengono riportate per gli indicatori SST e SSHA le distribuzioni relative ad ogni macroregione considerata sul Mediterraneo centrale.

L'analisi dei dati permette di individuare per ogni macroregione climatica che ricade nel Mediterraneo centrale le seguenti principali caratteristiche climatiche:

Macroregione climatica marina omogenea 1M: include il Mar Adriatico, il Mar Ligure e la parte settentrionale del Mare di Sardegna. Tale macroregione è caratterizzata dai valori più bassi di temperatura superficiale e di livello del mare.

Macroregione climatica marina omogenea 2M: individua prevalentemente il Mar Ionio e il Mar Tirreno; tale macroregione è caratterizzata da valori di temperatura superficiale intorno ai 20°C e da valori di livello del mare intorno ai -3 cm.

Macroregione climatica marina omogenea 3M: individua principalmente la parte meridionale del Mediterraneo centrale; tale macroregione è caratterizzata dai valori più alti di temperatura superficiale e al contempo dai valori più bassi di livello del mare.

Zonazione di riferimento



Macroregione	SST (°C)	SSH (m)
1M	18.2	-0.07
2M	19.6	-0.03
3M	20.3	0.05

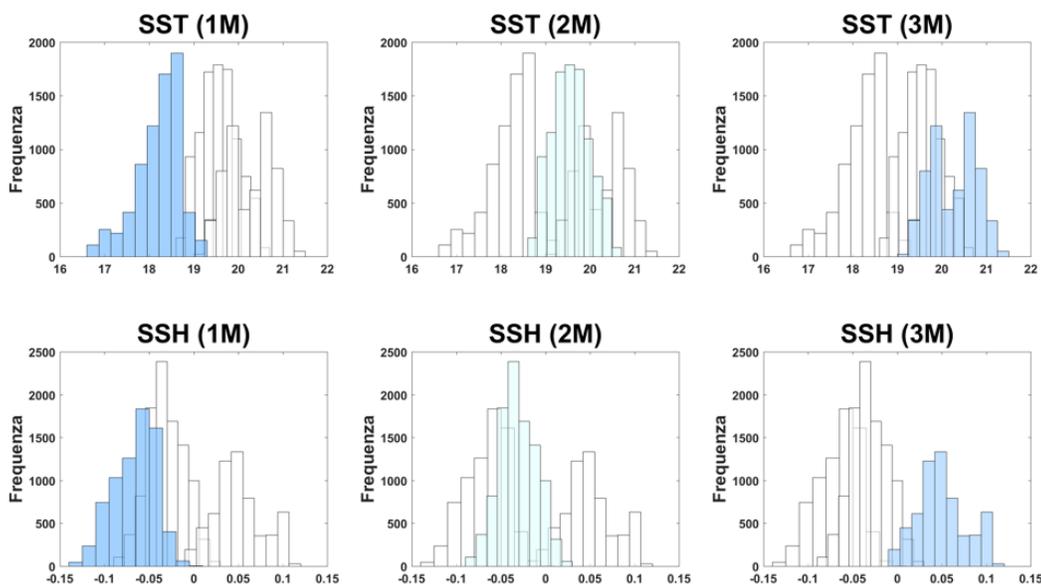


Figura 28: Zonazione climatica marina sul periodo climatico di riferimento (REAN 1987-2010) considerando un box sul Mediterraneo centrale.

PROIEZIONI CLIMATICHE FUTURE

Al fine di studiare le anomalie climatiche attese durante la metà del XXI secolo per quanto concerne la temperatura ed il livello del mare, sono stati considerati i dati delle simulazioni climatiche per il periodo 1981-2050 ottenuti tramite modello oceanico NEMO (Madec 2008) applicato al Mar Mediterraneo (7

km di risoluzione) e forzato con i dati atmosferici e idrologici del modello climatico CMCC-CM a ~80 Km di risoluzione orizzontale (Scoccimarro et al. 2011). La configurazione del modello impiegata in queste simulazioni, identificata come MEDSEA, è stata sviluppata dalla Fondazione CMCC e descrive l'evoluzione del sistema per lo scenario climatico RCP8.5 (Lovato et al. 2013). In generale, lo scenario RCP8.5 rappresenta la condizione più cautelativa in quanto descrive l'evoluzione del clima per uno scenario di emissioni "business as usual".

Utilizzando questo dataset, identificato con MEDSEA, in questa sezione sono state caratterizzate e analizzate le anomalie di temperatura superficiale e livello del mare tra i periodi 2021-2050 e 1981-2010 su base stagionale. Analogamente alla trattazione delle aree terrestri, le stagioni sono indicate con la seguente nomenclatura: DJF (December-January-February) per indicare l'inverno, MAM (March-April-May) per indicare la primavera, JJA (June-July-August) per indicare l'estate e SON (September-October-November) per indicare l'autunno.

Le anomalie della temperatura superficiale del mare indicano un aumento di circa 1.2 °C su base annuale per il bacino del Mediterraneo, ma la distribuzione stagionale fornisce un quadro più dettagliato dei cambiamenti nei mari italiani (Figura 29). In particolare, l'aumento maggiore rispetto al periodo di riferimento delle temperature invernali e primaverili si ha per il bacino Adriatico, con valori compresi tra 1.5 °C e 2 °C. Nel periodo estivo si hanno le anomalie più alte e diffuse nel Mar Tirreno (~1.5 °C), nell'alto Adriatico e nello Ionio. Le variazioni della temperatura del mare per le stagioni primaverile e autunnale sono molto simili, sebbene con alcune minime differenze a scala locale.

Le variazioni del livello del mare attese per il periodo 2021-2050 sono presentate su base stagionale in Figura 30. E' evidente una diversa dinamica tra il bacino orientale e occidentale del Mediterraneo, che si riflette nei valori attesi per il Mare Adriatico (+6 cm) e il Mar Tirreno (+8 cm). Le differenze maggiori si hanno nelle stagioni primaverile ed autunnale, in cui i valori del livello del mare nel Tirreno e nell'Adriatico superano rispettivamente 10 e 8 cm.

L'indicatore di rimescolamento calcolato per il periodo 2021-2050 (Figura 31) è confrontato con lo scenario presente 1981-2010 utilizzando il dataset MEDSEA. L'indicatore di rimescolamento sembra non cambiare nello scenario futuro nonostante l'aumento registrato di temperatura. Questa conclusione è confermata dall'analisi della profondità dello strato rimescolato che non evidenzia significativi cambiamenti nello scenario futuro rispetto al clima attuale (Lovato et al. 2013).

I valori di pH per il periodo 2041-2050 sono confrontati con lo scenario presente 2001-2010 (Figura 32). I dati relativi all'acidità dell'acqua della superficie del mare, espressa in termini di pH su scala totale, sono stati prodotti nell'ambito del progetto europeo MedSeA (<http://medsea-project.eu/>) (Lazzari et al. 2010). In particolare, questa simulazione si basa sui campi di temperatura, salinità, e circolazione del dataset fisico MEDSEA per riprodurre l'evoluzione della biogeochimica marina per il periodo 2000-2050. Poiché tali informazioni riguardano una finestra temporale più ridotta, il confronto tra il clima attuale e le anomalie attese nel corso del XXI secolo è stato condotto su base decennale, considerando rispettivamente i periodi 2001-2010 e 2041-2050.

La variazione spazio-temporale del pH è quasi uniforme in tutti i principali mari italiani e il confronto con lo scenario mostra una riduzione media di circa 0.1 unità. Il sottobacino del nord Adriatico è comunque caratterizzato da una variabilità stagionale, dovuta principalmente agli apporti di alcalinità dai fiumi, che riducono la variazione di pH nel periodo invernale a 0.06 unità.

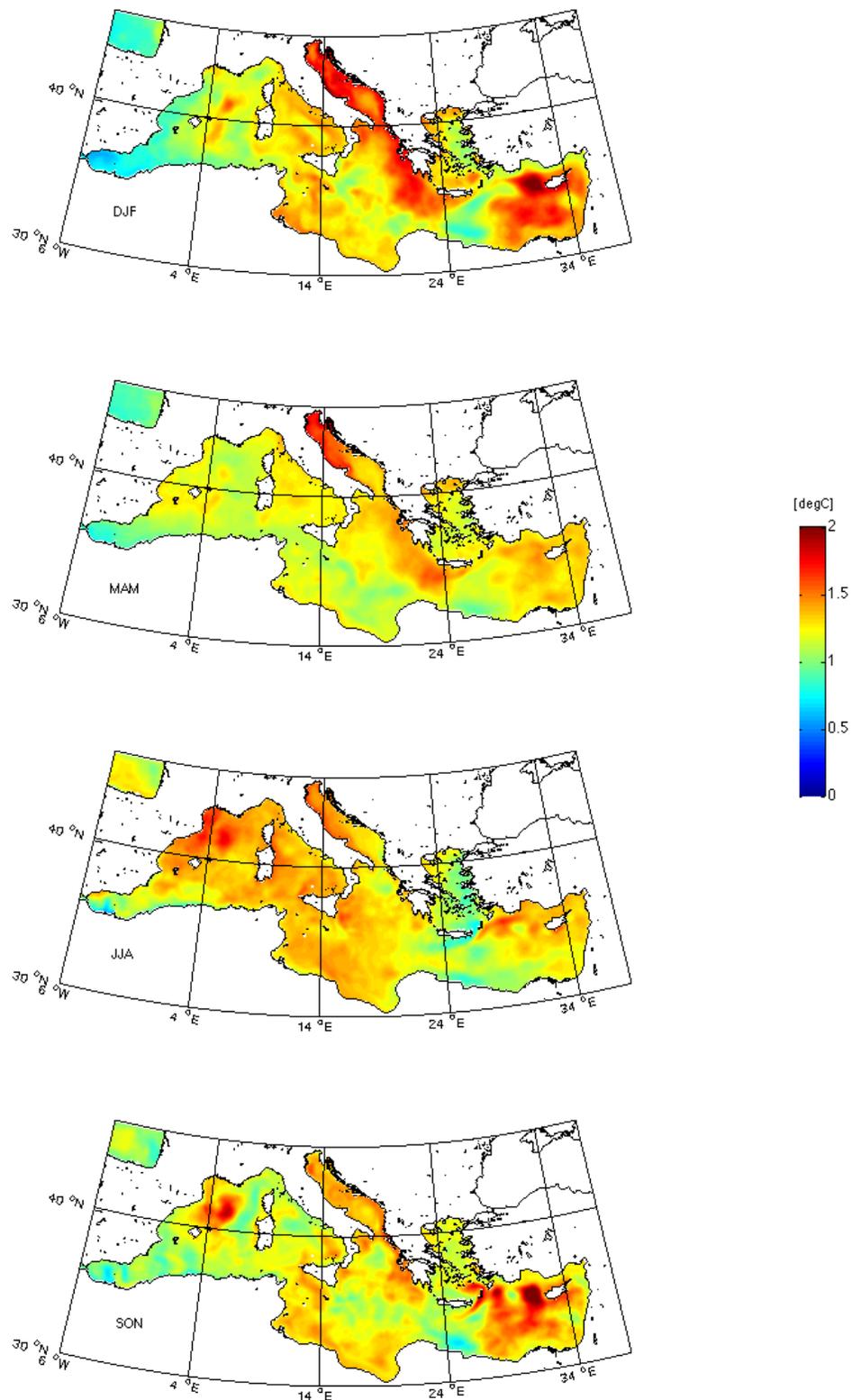


Figura 29: Differenza della temperatura superficiale (°C) media tra il periodo 2021-2050 (scenario RCP8.5) e 1981-2010 calcolata su base stagionale. I pannelli dall'alto al basso rappresentano la sequenza stagionale: DJF, MAM, JJA, SON.

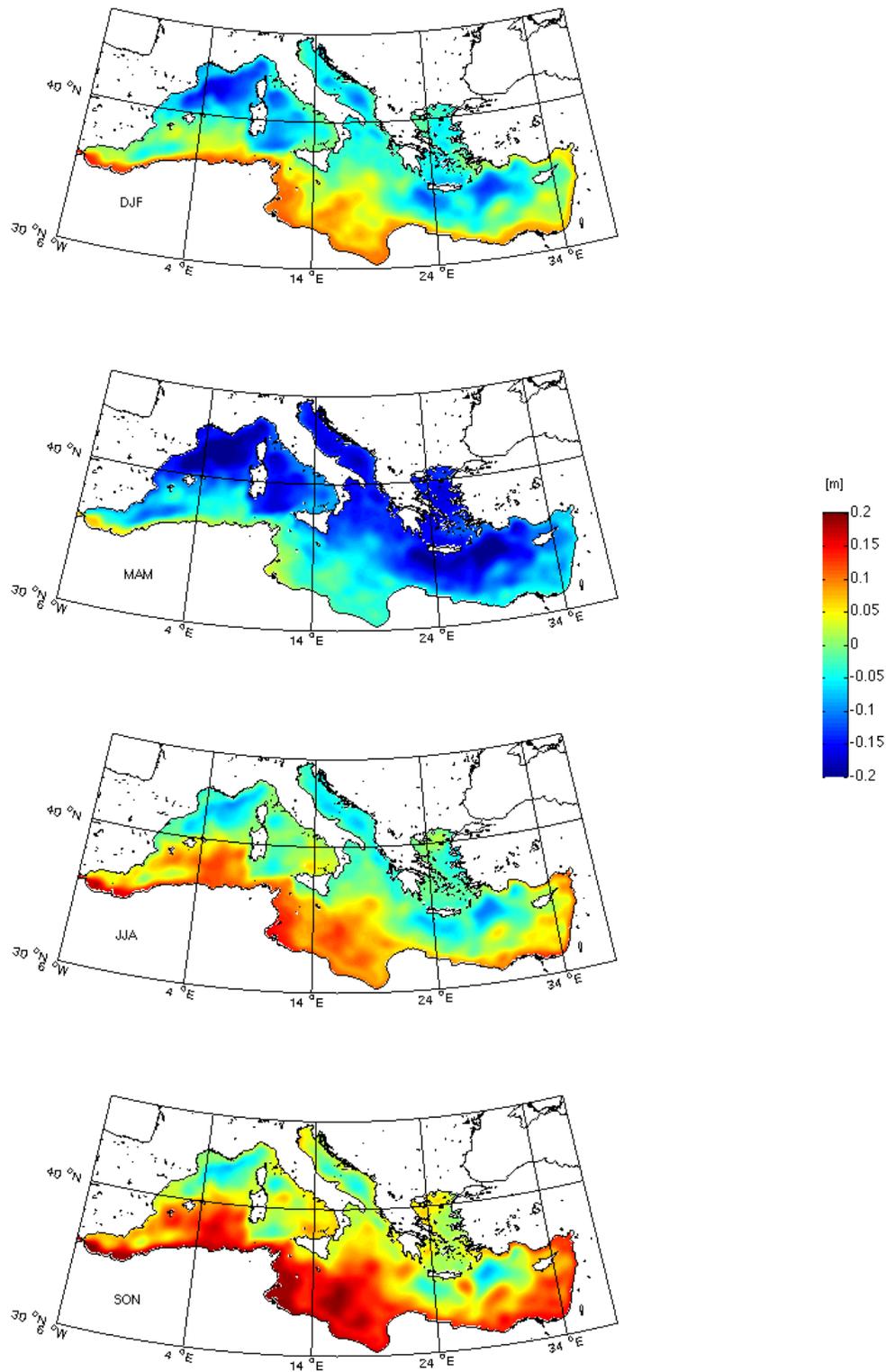


Figura 30: Differenza del livello del mare (metri) tra il periodo 2021-2050 (scenario RCP8.5) e 1981-2010 calcolata su base stagionale. I pannelli dall'alto al basso rappresentano la sequenza stagionale: DJF, MAM, JJA, SON.

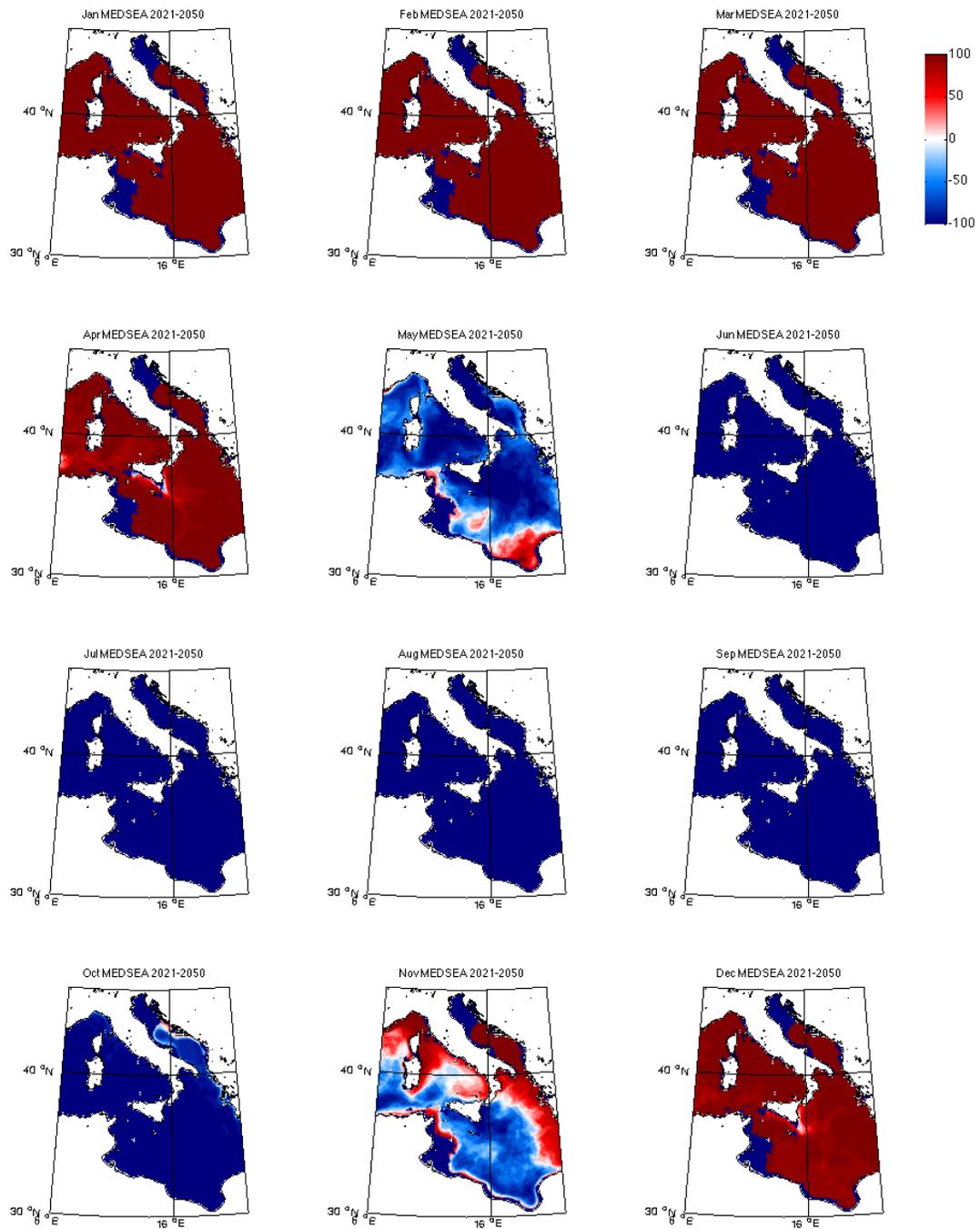


Figura 31: Mappe mensili dell'indicatore di rimescolamento proposto in Fratianni et al. 2016. Il dataset considerato è MEDSEA; le analisi sono state eseguite su medie mensili disponibili per il periodo 2021-2050.

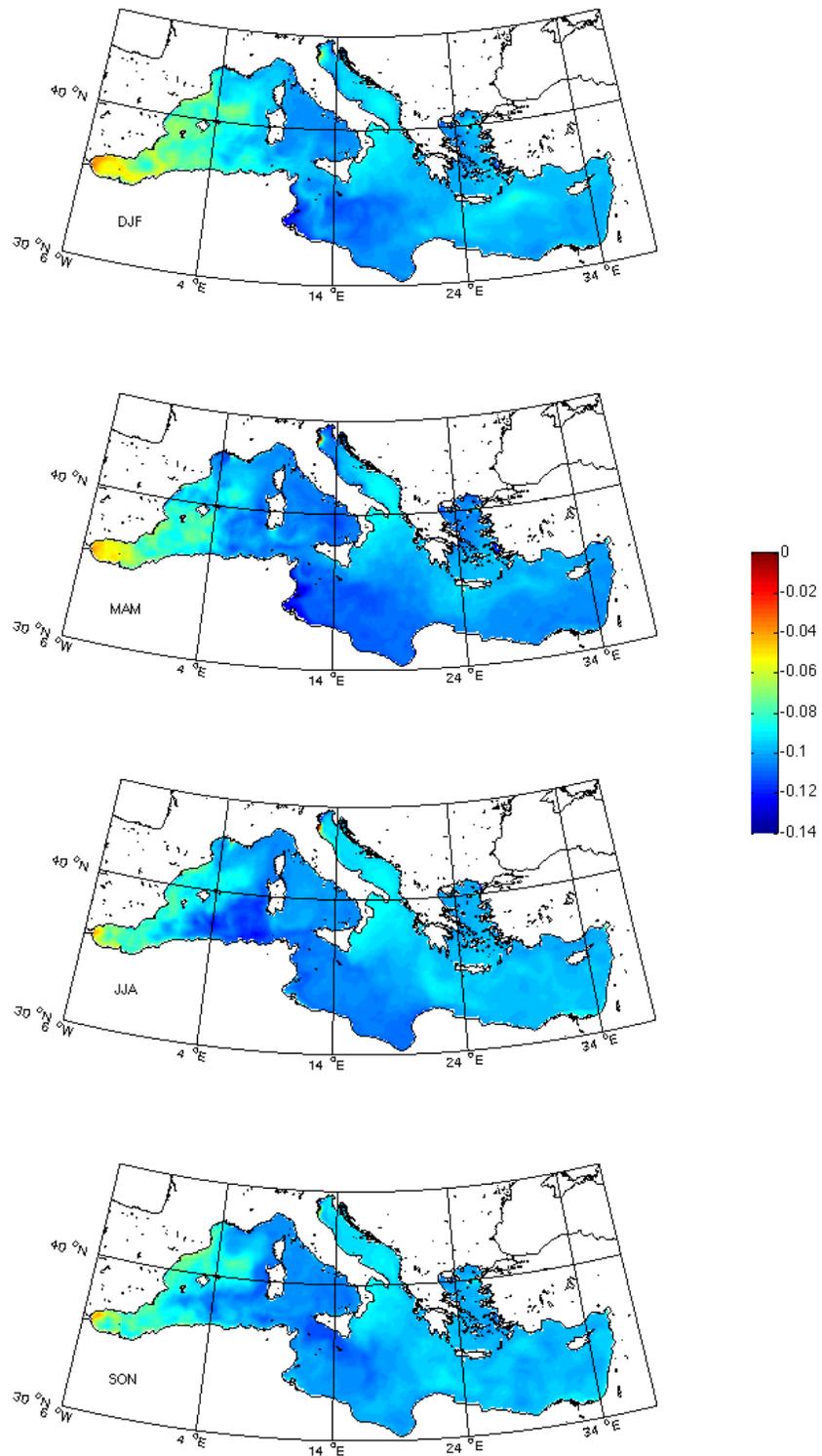


Figura 32: Differenza del valore medio di pH (scala totale) alla superficie del mare tra il periodo 2041-2050 (scenario RCP8.5) e 2001-2010 calcolati su base stagionale. I pannelli dall'alto al basso rappresentano la sequenza stagionale: DJF, MAM, JJA, SON.

Analisi delle aree costiere Italiane

In questa sezione è riportata un'analisi di dettaglio delle proiezioni climatiche future per le aree marine della fascia costiera. L'analisi è stata condotta sulla base della suddivisione regionale riportata nella *Marine Strategy Framework Directive* (MSFD, Directive 2008/56/EC), che identifica nel Mediterraneo cinque macro regioni marine: il Mediterraneo Ovest, il Mar Adriatico, il Mar Ionio, il Mediterraneo Centrale e il Mare Egeo-Levantino. In questa analisi abbiamo seguito la metodologia utilizzata in Fratianni et al. 2016 considerando le stesse sottoregioni riportate in Figura 33. La fascia costiera è stata identificata come la zona all'interno del limite di dodici miglia marine dalla costa e corrisponde alle acque territoriali.

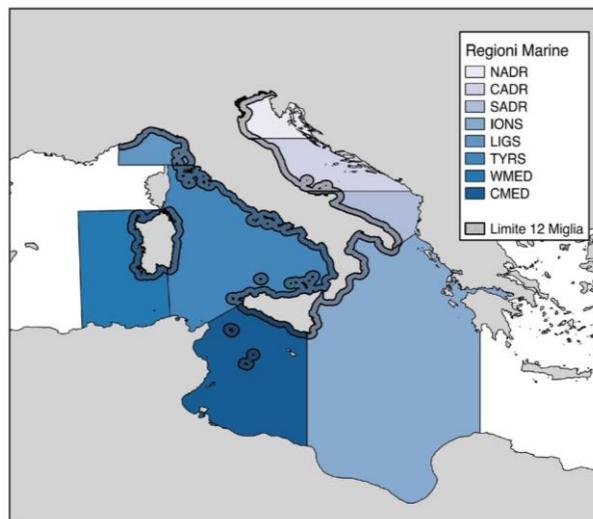


Figura 33: Divisione dei mari italiani in specifiche regioni marine proposta in (Fratianni et al. 2016). La zona ombreggiata indica il limite di 12 miglia dalla linea di costa. Le regioni marine sono identificate tramite i seguenti acronimi: NADR: Adriatico settentrionale, CADR: Adriatico Centrale, SADR: Adriatico meridionale, IONS: Mar Ionio e Mediterraneo centrale, LIGS: Mar Ligure, TYRS: Mar Tirreno, WMED: Mar Mediterraneo Occidentale, CMED: Mar Mediterraneo centrale.

Analisi della temperatura superficiale e del livello del mare

Nella Figura 34 e Figura 35 è illustrato il confronto tra le climatologie mensili di temperatura superficiale dell'acqua (SST) e livello del mare (SSH), rispettivamente, calcolate usando i dati di MEDSEA per il clima corrente (1981-2010) e lo scenario (2021-2050) per le aree costiere entro le 12 miglia marine definite in Figura 33. In particolare, i dati di livello del mare (Figura 35) rappresentano per entrambi i periodi la variazione rispetto al livello medio di riferimento calcolato sul periodo 1981-2010.

L'evoluzione mensile della SST nello scenario RCP8.5 mostra che tutte le aree costiere italiane saranno caratterizzate da un aumento di temperatura rispetto al periodo di riferimento 1981-2010. Tale aumento varia da un minimo di 1.3 °C nelle zone del Mediterraneo Centrale ed Occidentale e nel Mar Ligure ad un massimo di 1.6 °C nell'Adriatico settentrionale e centrale. L'aumento è pressoché costante durante tutto l'anno mantenendo quindi invariata la stagionalità di ciascuna zona.

Analogamente alla temperatura superficiale dell'acqua, l'aumento del livello del mare durante il periodo 2021-2050 per lo scenario RCP8.5 caratterizza tutte le aree costiere. Rispetto al periodo di riferimento

1981-2010, i valori vanno da un minimo di 7 cm per le tre sottoregioni del bacino Adriatico e nel Mar Ionio, fino ad un massimo di 9 cm nel Mar Tirreno, e nel Mediterraneo centrale e occidentale.

Analisi dell'acidità superficiale del mare

Il confronto tra le climatologie mensili di pH per i periodi 2001-2010 e 2041-2050 calcolate per la fascia costiera delle regioni di riferimento è rappresentato in Figura 37. E' evidente una riduzione uniforme di 0.1 unità nell'arco dell'intero anno, mentre la variabilità stagionale del pH simulata nello scenario futuro è comparabile a quella del clima attuale per tutte le aree costiere. Questa tendenza è confrontabile con le stime relative agli oceani su scala globale ottenute nell'ambito del progetto CMIP5 (Bopp et al. 2013).

Analisi dell'indicatore di rimescolamento

L'indicatore di rimescolamento calcolato per il periodo 2021-2050 (Figura 21) è confrontato con lo scenario presente 1981-2010 utilizzando il dataset MEDSEA limitatamente alle zone costiere entro le 12 miglia dei mari Italiani e analizzato per le diverse regioni identificate per la MSFD (Figura 33). L'indicatore di rimescolamento sembra non cambiare nello scenario futuro nonostante l'aumento registrato di temperatura, soltanto nella sottoregione del Mediterraneo centrale (CMED) si nota un'estensione del periodo con maggiore stratificazione (Figura 36).

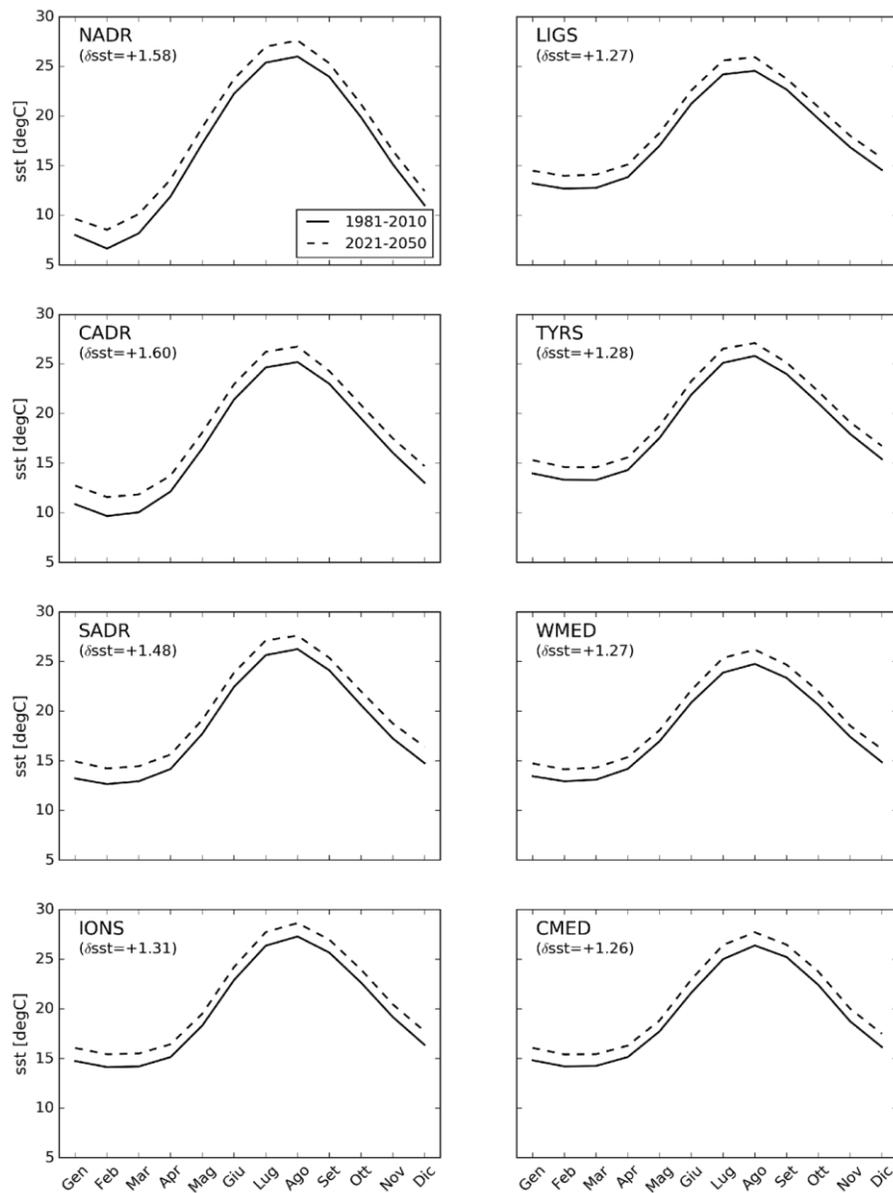


Figura 34: Confronto delle climatologie mensili di temperatura superficiale dell'acqua (sst, °C) tra il 1981-2010 (linea continua) e lo scenario RCP8.5 nel periodo 2021-2050 (linea tratteggiata) per la fascia costiera entro le 12 miglia marine delle regioni marine definite nella Figura 33 .Il valore δsst rappresenta la differenza calcolata su base annuale tra i due periodi.

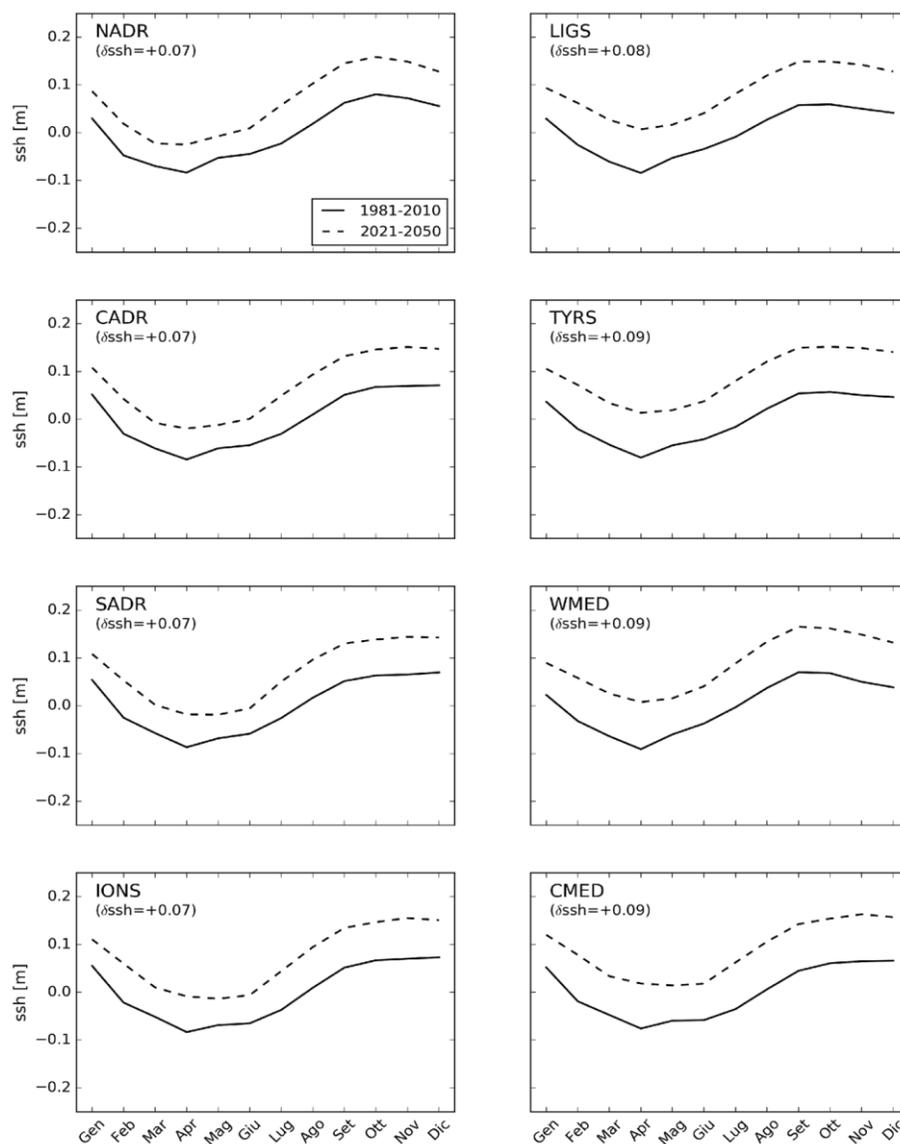


Figura 35: Confronto delle climatologie mensili del livello del mare (ssh, m) tra il 1981-2010 (linea continua) e lo scenario RCP8.5 nel periodo 2021-2050 (linea tratteggiata) per la fascia costiera entro le 12 miglia marine delle regioni marine definite nella Figura 33. Il valore δssh rappresenta la differenza calcolata su base annuale tra i due periodi.

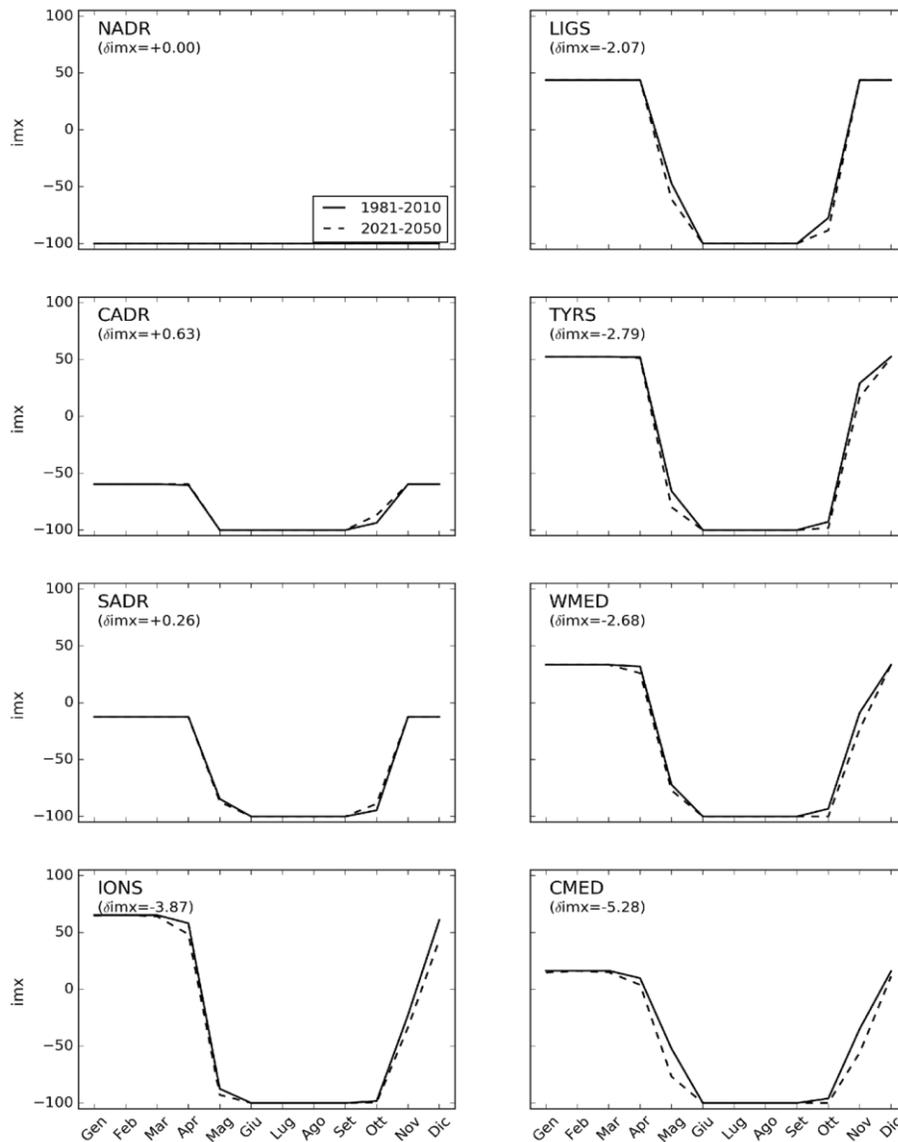


Figura 36: Confronto delle climatologie mensili dell'indicatore di rimescolamento (mixing - imx) tra il 1981-2010 (linea continua) e lo scenario RCP8.5 nel periodo 2021-2050 (linea tratteggiata) per la fascia costiera entro le 12 miglia marine delle regioni marine definite nella Figura 33 . Il valore Δimx rappresenta la differenza calcolata su base annuale tra i due periodi.

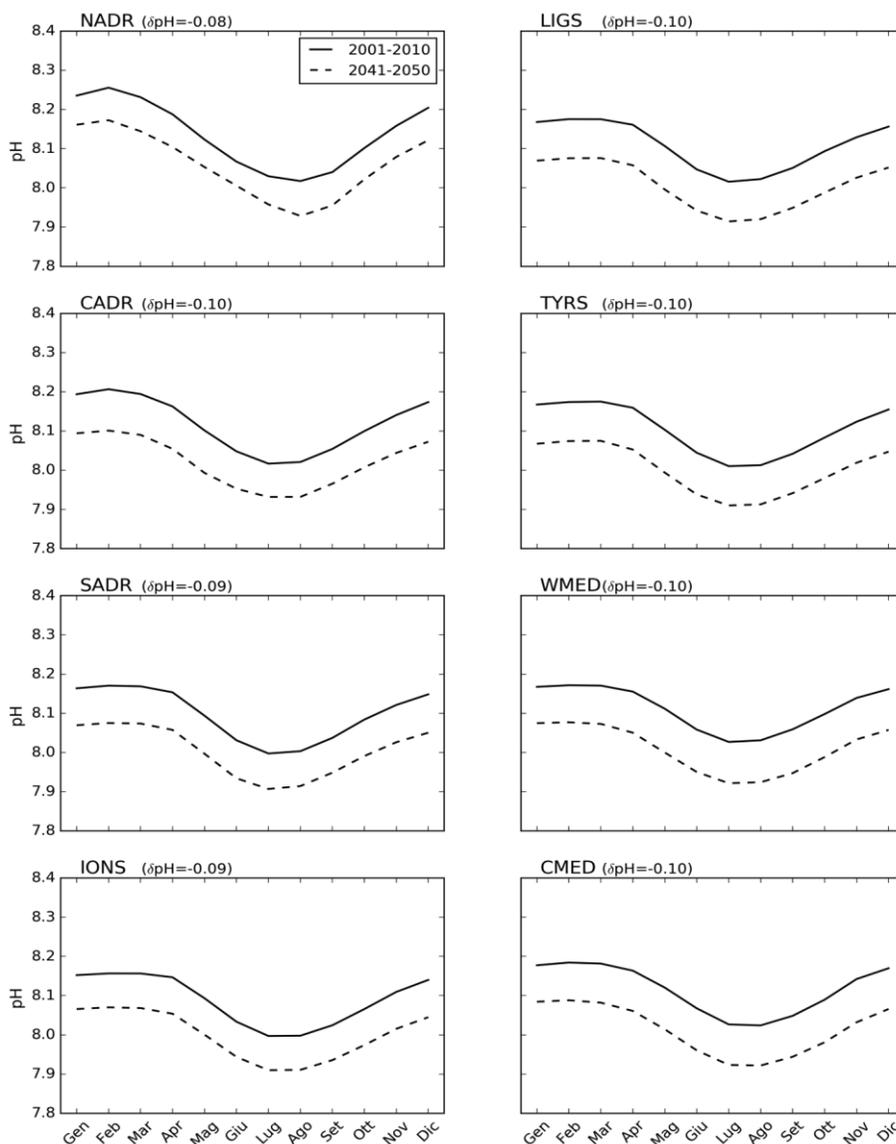


Figura 37: Confronto delle climatologie mensili del pH (scala totale) alla superficie del mare tra il 2001-2010 (linea continua) e lo scenario RCP8.5 nel periodo 2041-2050 (linea tratteggiata) per la fascia costiera entro le 12 miglia marine delle regioni marine definite Figura 33. Il valore δpH rappresenta la differenza calcolata su base annuale tra i due periodi.

ZONAZIONE CLIMATICA DELLE ANOMALIE PER LE PROIEZIONI CLIMATICHE FUTURE (2021-2050)

Le analisi condotte nel presente paragrafo hanno l'obiettivo di individuare aree caratterizzate da anomalie climatiche simili per la temperatura superficiale e il livello del mare, indicate rispettivamente come SSTa e SSHA. Tali variazioni sono valutate utilizzando i risultati del modello del CMCC per lo scenario RCP8.5, indentificato come MEDSEA.

Le distribuzioni spaziali e di frequenza per SSTa e SSHA tra i periodi 2021-2050 e 1981-2010 su base annuale impiegate per la zonazione climatica con scenario RCP8.5 sono illustrate nella Figura 38. Le

anomalie della temperatura superficiale del mare indicano un aumento generale su base annuale che varia da circa 1.3°C nel Mar Tirreno a circa 1.5°C nell'Adriatico. Per quanto riguarda, invece, le variazioni del livello del mare attese per il periodo 2021-2050, esse risultano essere di circa 7 cm nell'Adriatico e nel Mar Ionio, mentre nel Mediterraneo occidentale risultano assumere valori nettamente superiori (intorno ai 9 cm). In questo caso le anomalie degli indicatori selezionati sono inversamente correlate (coefficiente di correlazione=-0.35).

Infine, tali dati sono stati utilizzati per identificare delle aree omogenee di anomalie attraverso la metodologia cluster. Valutando gli indici di Silhouette, di Calinski Harabasz e David-Bouldin, già descritti nel capitolo Aree Terrestri, è stato individuato 3 come numero ottimale di cluster. I risultati degli indici di consistenza vengono mostrati in Figura 39.

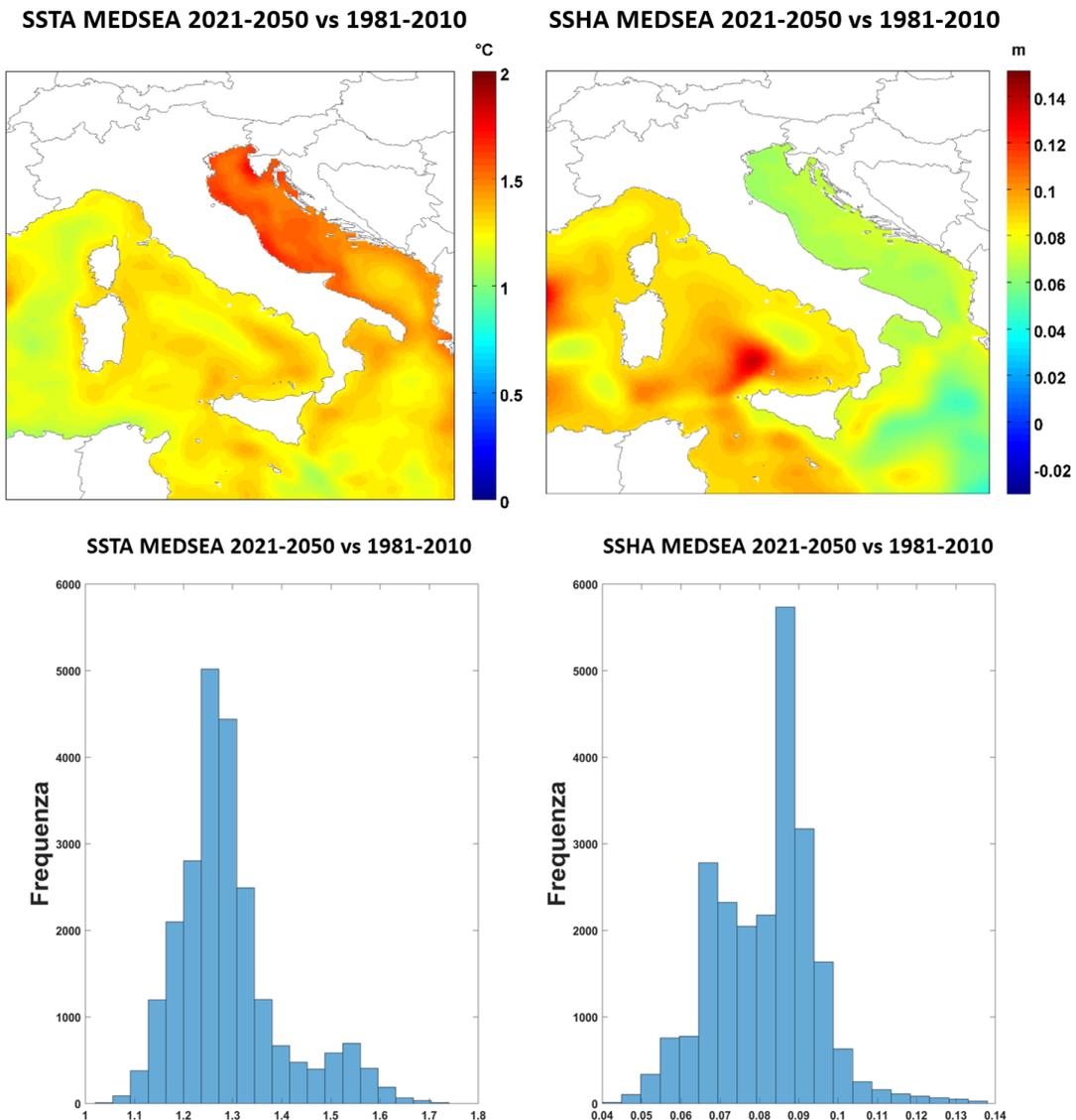


Figura 38: Climatologie degli indicatori SSTA e SSHA (pannelli superiori) e relative distribuzioni di frequenza (pannelli inferiori) sul Mediterraneo centrale ottenute dal dataset MEDSEA RCP8.5 per il periodo 2021-2050 vs

1981-2010).

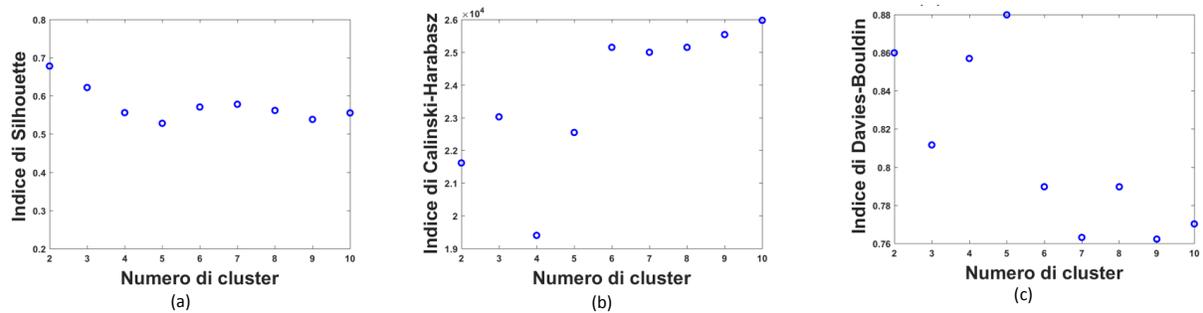


Figura 39: Metriche per l'identificazione del numero di cluster calcolate per il dataset MEDSEA RCP8.5 (box Mediterraneo centrale): (a) Indice di Silhouette, (b) Indice di Calinski-Harabasz, (c) Indice di Davies-Bouldin.

La zonazione climatica marina delle anomalie per lo scenario RCP8.5 è mostrata in Figura 40 insieme alla distribuzione delle anomalie all'interno delle singole classi.

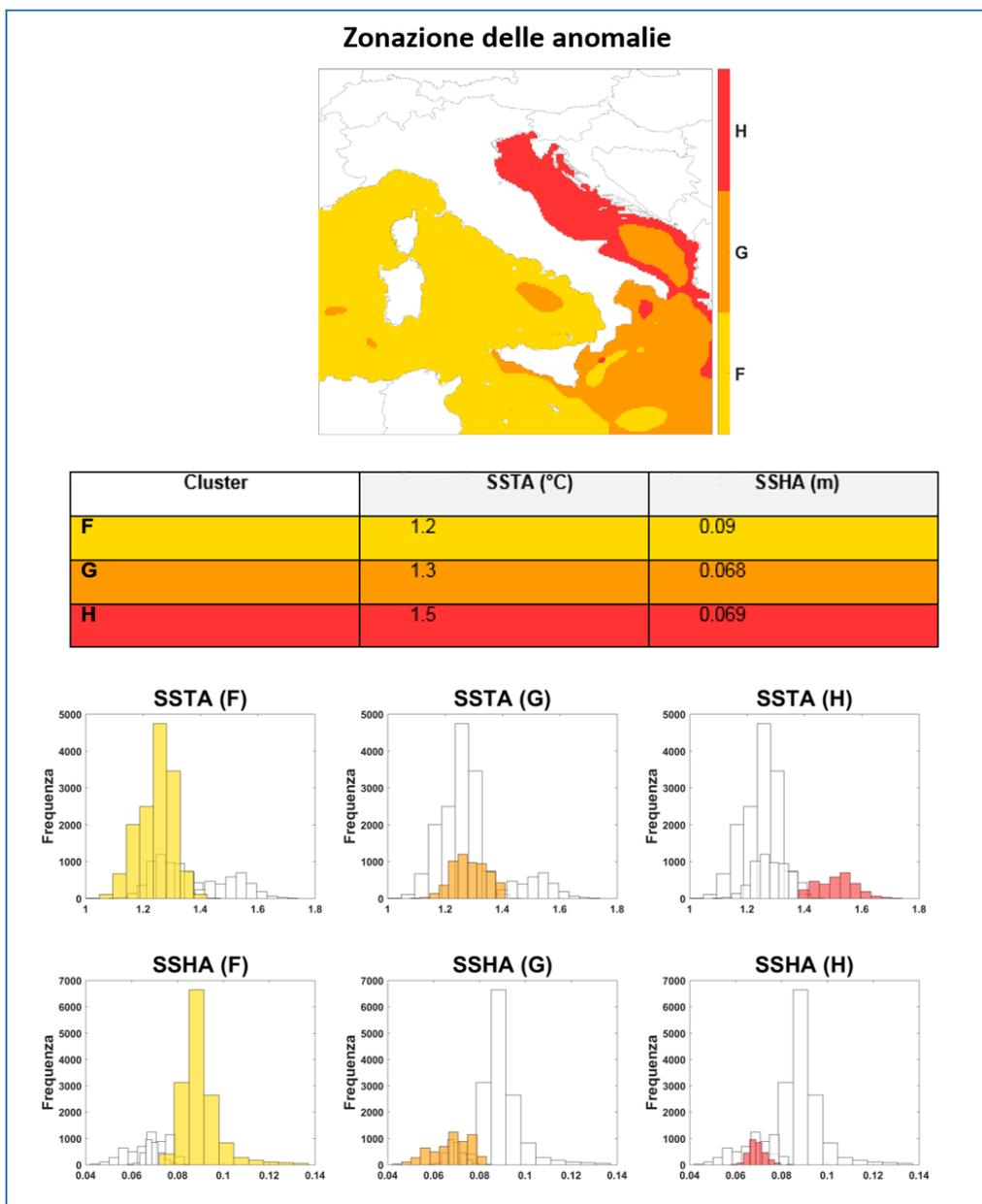
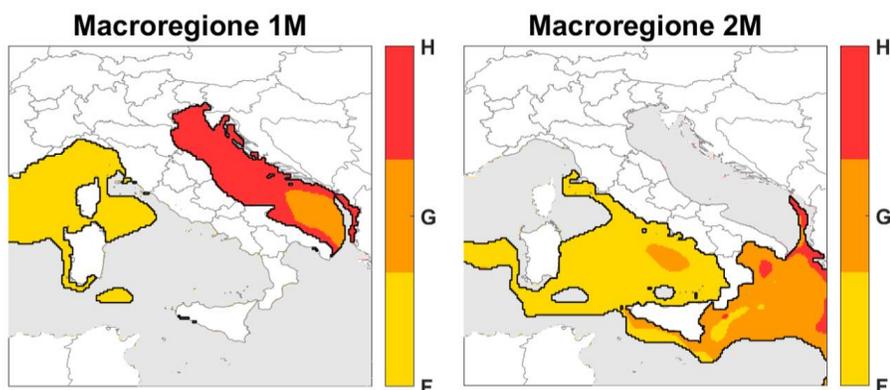


Figura 40: Zonazione climatica delle anomalie di temperatura superficiale (SSTA) e livello del mare (SSHA) per il dataset MEDSEA RCP8.5 (2021-2050 vs 1981-2010) considerando un box sul Mediterraneo centrale.

INDIVIDUAZIONE DELLE AREE CLIMATICHE OMOGENEE

Per agevolare i successivi studi settoriali e facilitare il lettore nell'individuazione delle anomalie prevalenti per ciascuna macroregione climatica marina omogenea, i cluster delle anomalie sono stati visualizzati separatamente per ognuna delle macroregioni climatiche omogenee (Figura 41). In particolare, vengono definite "aree climatiche omogenee" le zone che derivano dalla sovrapposizione delle macroregioni (indicate con i numeri) con i cluster delle anomalie (indicate con lettere). In questa fase di studio, sono state considerate solo le macroregioni 1M e 2M in modo tale da concentrare le

analisi solo sul territorio nazionale. La Tabella 9 fornisce una descrizione sintetica delle anomalie climatiche che caratterizzano le due macroregioni climatiche omogenee che ricadono nel territorio nazionale.



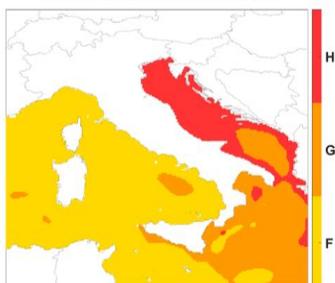
Macroregioni climatiche omogenee



Valori medi delle macroregioni di interesse (1987-2010)

Macroregione	SST (°C)	SSH (m)
1M	18.2	-0.07
2M	19.6	-0.03

Cluster delle anomalie



Valori medi dei cluster delle anomalie (2021-2051 vs 1981-2010)

Cluster	Anomalia SSTA (°C)	Anomalia SSHA (m)
F	1.2	0.09
G	1.3	0.068
H	1.5	0.069

Figura 41: Zonazione climatica marina delle anomalie (2021-2050 vs 1981-2010, scenario RCP8.5) per le macroregioni climatiche 1M e 2M. Per agevolare la lettura sono state riportate anche le informazioni relative alla zonazione di riferimento (1987-2010) e al quadro complessivo dei cluster delle anomalie.

Tabella 9: Descrizione delle anomalie climatiche per le macroregioni climatiche 1M e 2M.

Macroregioni climatiche omogenee	Descrizione delle aree climatiche omogenee principali che ricadono nelle macroregioni considerando il Mediterraneo centrale
1M	<i>Cluster predominanti: 1F, 1H</i> <i>Anomalie principali:</i> per la macroregione 1M si possono osservare due andamenti a seconda del bacino considerato; in particolare, l'area concentrata sull'Adriatico è caratterizzata da un aumento significativo dei valori di temperatura superficiale (1.5°C), invece la zona che individua il Mar Ligure e la parte settentrionale del Mare di Sardegna è soggetta ad un incremento significativo del livello del mare (9 cm).
2M	<i>Cluster predominanti: 2F, 2G</i> <i>Anomalie principali:</i> per la macroregione 2M, si osserva, oltre ad un aumento generale della temperatura superficiale di circa 1.3°C, un aumento significativo del livello del mare (di circa 9 cm) che si concentra sul Mar Tirreno e sul Mare di Sardegna.

SINTESI

La caratterizzazione delle aree marine del territorio nazionale esposte a rilevanti variazioni climatiche future rispetto alle condizioni attuali è stata condotta tramite una prima analisi mirata a fornire un quadro climatico generale a diverse scale spaziali e temporali e, in seguito, la definizione di aree climatiche omogenee all'interno di macroregioni marine tramite la stessa metodologia impiegata per la zonazione terrestre. In entrambi i casi sono state considerate quali variabili primarie la temperatura superficiale dell'acqua e il livello del mare, mentre l'analisi del quadro climatico è stata integrata anche le informazioni relative all'acidità dell'acqua e al rimescolamento della colonna d'acqua.

Il confronto iniziale tra i dati delle rianalisi oceaniche e del modello forzato per le variabili fisiche e biogeochimiche nel clima attuale ha permesso di verificare la robustezza di quest'ultimo nel descrivere lo stato dei mari nel periodo di riferimento.

L'integrazione delle metodologie proposte consente di tracciare un quadro generale delle potenziali variazioni climatiche future che interesseranno le diverse aree marine italiane:

Il mare Adriatico presenta il cambiamento più significativo della temperatura media pari a circa +1.5°C (cluster H), con variazioni nel periodo invernale e primaverile che potranno raggiungere +2°C; al contrario questo bacino mostra un aumento del livello del mare più contenuto pari a circa 7 cm.

I mari Ligure e Tirreno, sebbene separati in due macroregioni diverse, presentano la medesima caratterizzazione delle anomalie future, con un incremento atteso pari a 1.2°C per la temperatura e a 9 cm per il livello del mare.

Il Mar Ionio e il canale di Sicilia appartengono alla medesima macroregione e mostrano un aumento medio della temperatura e del livello del mare (cluster G) rispettivamente di 1.3°C e 7 cm.

L'evoluzione futura del pH per le aree marine del territorio nazionale indica una riduzione uniforme dei valori di circa 0.1 unità, ovvero un aumento dell'acidità del mare.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Bohm U, Kucken M, Ahrens W, et al (2006) The Climate Version of LM: Brief Description and Long-Term Applications. COSMO Newsl 225–235.
- Bopp L, Resplandy L, Orr JC, et al (2013) Multiple stressors of ocean ecosystems in the 21st century: projections with CMIP5 models. *Biogeosciences* 10:6225–6245. doi: 10.5194/bg-10-6225-2013
- Breugem W-P, Hazeleger W, Haarsma RJ (2007) Mechanisms of Northern Tropical Atlantic Variability and Response to CO₂ Doubling. *J Clim* 20:2691–2705. doi: 10.1175/jcli4137.1
- Bucchignani E, Montesarchio M, Zollo AL, Mercogliano P (2016) High-resolution climate simulations with COSMO-CLM over Italy: performance evaluation and climate projections for the 21st century. *Int J Climatol* 36:735–756. doi: 10.1002/joc.4379
- Calinski T, Harabasz J (1974) A dendrite method for cluster analysis. *Commun Stat - Theory Methods* 3:1–27. doi: 10.1080/03610927408827101
- Davies DL, Bouldin DW (1979) A Cluster Separation Measure. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell PAMI-1*:224–227. doi: 10.1109/tpami.1979.4766909
- Drobinski P, Silva N Da, Panthou G, et al (2016) Scaling precipitation extremes with temperature in the Mediterranean: past climate assessment and projection in anthropogenic scenarios. *Clim. Dyn.* 1–21.
- Fратиanni C, Pinardi N, Lalli F, et al (2016) Operational oceanography for the Marine Strategy Framework Directive: the case of the mixing indicator. *J Oper Oceanogr* 9:s223----s233. doi: 10.1080/1755876x.2015.1115634
- Gaspar P, Grégoris Y, Lefevre J-M (1990) A simple eddy kinetic energy model for simulations of the oceanic vertical mixing: Tests at station Papa and long-term upper ocean study site. *J Geophys Res* 95:16179. doi: 10.1029/JC095iC09p16179
- Giorgi F, Jones C, Asrar GR (2009) Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework. *Bull - World Meteorol Organ* 58:175–183.
- Hartigan JA, Wong MA (1979) A K-Means Clustering Algorithm. *Appl Stat* 28:100–108. doi: 10.2307/2346830
- Haylock MR, Hofstra N, Tank AMGK, et al (2008) A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950-2006. *J Geophys Res.* doi: 10.1029/2008jd010201
- IPCC (2013) Summary for Policymakers. In: Stocker TF, D. Qin, G.-K. Plattner, et al. (eds) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge (United Kingdom) and New York (NY, USA), pp 1–30
- Jacob D, Petersen J, Eggert B, et al (2014) EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Reg Environ Chang* 14:563–578. doi: 10.1007/s10113-013-0499-2
- Karl TR, Nicholls N, Ghazi A (1999) CLIVAR/GCOS/WMO Workshop on Indices and Indicators for Climate Extremes - Workshop summary. In: *Climatic Change.* pp 3–7
- Kaufman L, Rousseeuw P (1990) *Finding Groups in Data.* Wiley & Sons, New York
- Kotlarski S, Bosshard T, Lüthi D, et al (2012) Elevation gradients of European climate change in

- the regional climate model COSMO-CLM. *Clim Change* 112:189–215. doi: 10.1007/s10584-011-0195-5
- Kotlarski S, Keuler K, Christensen OB, et al (2014) Regional climate modeling on European scales: A joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble. *Geosci Model Dev* 7:1297–1333. doi: 10.5194/gmd-7-1297-2014
- Lazzari P, Teruzzi A, Salon S, et al (2010) Pre-operational short-term forecasts for Mediterranean Sea biogeochemistry. *Ocean Sci* 6:25–39. doi: 10.5194/os-6-25-2010
- Lovato T, Vichi M, Oddo P (2013) High-Resolution Simulations of Mediterranean Sea Physical Oceanography Under Current and Scenario Climate Conditions: Model Description, Assessment and Scenario Analysis.
- MacQueen J (1967) Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In: *Berkeley Symp. on Math. Statist. and Prob.* University of California Press, Berkeley, Calif., p Volume 1: Statistics, 281–297
- Madec G V. (2008) NEMO Ocean engine.
- MATTM (2014) Rapporto sullo stato delle conoscenze scientifiche su impatti , vulnerabilità ed adattamento ai cambiamenti climatici in Italia. Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, Roma
- Meinshausen M, Smith SJ, Calvin K, et al (2011) The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Clim Change* 109:213–241. doi: 10.1007/s10584-011-0156-z
- Milligan GW, Cooper MC (1988) A study of standardization of variables in cluster analysis. *J Classif* 5:181–204. doi: 10.1007/bf01897163
- Mooi E, Sarstedt M (2011) Cluster Analysis. In: *A Concise Guide to Market Research.* Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp 237–284
- Moum JN, Smyth WD (2001) Upper ocean mixing processes. In: Steele JH, Thorpe SA, Turekian KK (eds) *Encyclopedia of Ocean Sciences*, Vol. 6. Academic Press, London, UK, pp 3093–3100
- Peterson A (2011) A separability index for clustering and classification problems with applications to cluster merging and systematic evaluation of clustering algorithms. Iowa State University
- Peterson A, Ghosh A, Maitra R (2010) A systematic evaluation of different methods for initializing the K-means clustering algorithm. *Knowl Creat Diffus Util* 1–11.
- Peterson T (2001) Report on the Activities of the Working Group on Climate Change Detection and Related Rapporteurs 1998-2001. International CLIVAR Project Office, Southampton, UK
- Rockel B, Geyer B (2008) The performance of the regional climate model CLM in different Climate regions, based on the example of precipitation. *Meteorol Zeitschrift* 17:487–498. doi: 10.1127/0941-2948/2008/0297
- Schmidt-Thomé P, Greiving S (2013) European climate vulnerabilities and adaptation : a spatial planning perspective. Wiley-Blackwell
- Scoccimarro E, Gualdi S, Bellucci A, et al (2011) Effects of Tropical Cyclones on Ocean Heat Transport in a High-Resolution Coupled General Circulation Model. *J Clim* 24:4368–4384. doi: 10.1175/2011jcli4104.1
- van Vuuren DP, Edmonds J, Kainuma M, et al (2011) The representative concentration

- pathways: an overview. *Clim Change* 109:5–31. doi: 10.1007/s10584-011-0148-z
- Wagner T, Themeßl M, Schüppel A, et al (2017) Impacts of climate change on stream flow and hydro power generation in the Alpine region. *Environ Earth Sci* 76:4. doi: 10.1007/s12665-016-6318-6
- Ward JH (1963) Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function. *J Am Stat Assoc* 58:236–244. doi: 10.2307/2282967
- Zollo AL, Rillo V, Bucchignani E, et al (2016) Extreme temperature and precipitation events over Italy: assessment of high-resolution simulations with COSMO-CLM and future scenarios. *Int J Climatol* 36:987–1004. doi: 10.1002/joc.4401