

ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

FACOLTÀ DI SCIENZE MATEMATICHE FISICHE NATURALI

Corso di laurea in SCIENZE AMBIENTALI

***PREVISIONE DI VARIABILITA'
CLIMATICA SUL MEDITERRANEO, ANNI
2000-2030***

Relatore:
Prof. ***NADIA PINARDI***

Presentata da:
MATTEO MARESI

III SESSIONE
Anno Accademico 2007-2008

1.Introduzione

Gli studi di paleoclimatologia evidenziano che il clima terrestre ha mostrato, anche nel remoto passato, una marcata variabilità che si manifesta su di un ampio spettro di scale spaziali e temporali ed è correlabile alla sovrapposizione degli effetti di molteplici e complessi cicli naturali, esterni e interni alla Terra.

La consapevolezza che le attività antropiche, in grado di modificare in modo significativo la composizione dell'atmosfera, sono divenute un nuovo forzante climatico e la necessità di comprendere i cambiamenti in atto per poterne prevedere gli effetti e i possibili impatti futuri, hanno indotto la Comunità Scientifica internazionale a sviluppare strumenti in grado di indagare i meccanismi che governano il clima e di prevederne il comportamento. A causa della complessità del sistema Terra risulta impossibile condurre esperimenti in laboratorio e per verificare ipotesi e teorie è indispensabile ricorrere all'uso di modelli numerici di simulazione, basati sulla rappresentazione matematica delle leggi fisiche, delle interazioni chimiche e dei processi attivi nel sistema climatico.

Per definire la tendenza futura del clima è importante che i modelli siano inoltre integrati con delle ipotesi sui possibili scenari sociali, economici, tecnologici e produttivi futuri, in grado di influenzare l'evoluzione dei forzanti climatici, in particolare dei gas serra e degli aerosol. Tali scenari sono stati descritti nello *Special Report on Emissions Scenarios* (SRES) pubblicato nel 2001 dall'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), organo intergovernativo scientifico formatosi nel 1988 da due organismi delle Nazioni Unite (WMO e UNEP) con lo scopo di fornire ai decisori politici una valutazione della letteratura tecnico-scientifica rilevante per comprendere il fenomeno del cambiamento climatico, i suoi possibili impatti e le eventuali misure di adattamento e mitigazione da mettere in atto. Gli scenari di emissione descrivono probabili mondi futuri, diversi tra loro sotto vari aspetti: crescita demografica, utilizzo di fonti energetiche, sviluppo tecnologico, uso e disponibilità di risorse e attuazione di politiche di mitigazione nei confronti del cambiamento climatico.

In questo contesto risulta fondamentale analizzare come una tendenza globale di cambiamento si distribuisca su scala regionale tramite lo sviluppo di modelli regionali (RCM) ad alta risoluzione, in grado di rappresentare con minore approssimazione la realtà fisica di determinate aree del globo e i fattori locali in grado di influenzarne il clima come la conformazione del territorio e l'orografia. In particolare il Mediterraneo è una regione geografica complessa e per poterne descrivere la climatologia sono necessari modelli dotati di un'alta risoluzione orizzontale.

Lo scopo della tesi è verificare la capacità del modello regionale EBU-POM, di riprodurre le caratteristiche del clima attuale del Mediterraneo confrontando i valori dei campi delle simulazioni con le osservazioni misurate. I dati utilizzati per lo studio dell'errore di EBU provengono dall'*European centre for Medium Range Weather Forecast* (ECMWF, Reading UK, www.ecmwf.int). ECMWF elabora le osservazioni provenienti da radiosonde, da satelliti, da stazioni di terra, da aerei e da navi mercantili integrandole con simulazioni di modelli numerici, ottenendo un'analisi che offre la stima più accurata dello stato dell'atmosfera.

In seguito sarà fornita una valutazione del clima del bacino Mediterraneo nei prossimi trent'anni tramite l'analisi della simulazione di scenario effettuata con il modello. Lo scenario di emissioni su cui è stato integrato il modello è denominato A1b [SRES 2001, IPCC] e descrive un mondo futuro dominato da una rapida crescita economica e dall'utilizzo di nuove e più efficienti tecnologie, in cui la popolazione mondiale raggiunge il suo massimo nella metà del XXI secolo e successivamente decresce. La convergenza tra le diverse regioni del globo e la maggiore integrazione sociale e culturale portano ad una sostanziale riduzione delle differenze nel reddito pro-capite. In questo scenario si prevede inoltre un utilizzo bilanciato di fonti energetiche rinnovabili e di combustibili fossili.

Nella figura 1 sono riportati i valori delle emissioni antropiche di gas serra e di aerosol per gli scenari IPCC.

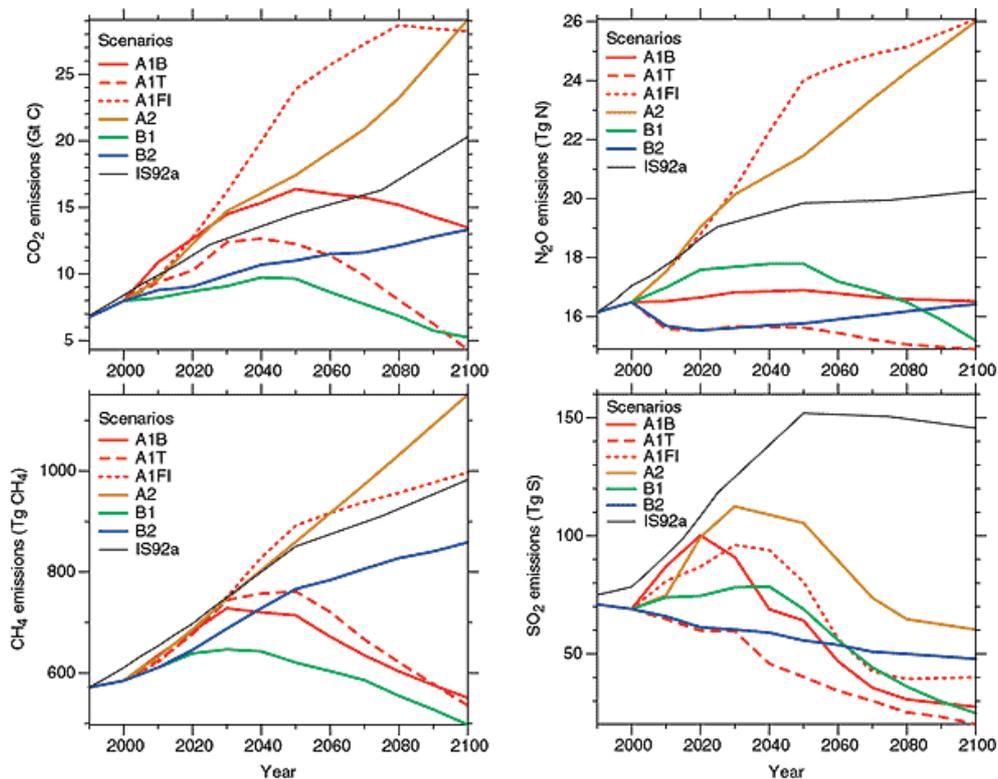


Fig. 1: Emissioni antropiche dei tre principali gas ad effetto serra (CO₂, N₂O e CH₄) e del biossido di zolfo (SO₂) per i sei scenari socio economici[SRES, IPCC 2001].

2.Sistema Climatico e Variabilità

A livello descrittivo il clima di una determinata zona comprende l'insieme delle condizioni meteorologiche medie rispetto a uno specifico intervallo temporale e la *World Meteorological Organization* (WMO) ha stabilito che la durata minima della serie di dati continui per poter individuare le caratteristiche climatiche di un'area è di 30 anni. Le condizioni climatiche di una regione sono quindi caratterizzate dai valori medi nel tempo di fenomeni fisici misurabili quali temperatura, umidità, regimi di precipitazioni, venti e pressione atmosferica, denominati *elementi climatici* e determinati da *fattori* che possono essere *zonali*, se agiscono regolarmente dall'equatore ai poli, e *geografici*, quando peculiari di ogni località.

In termini fisici il clima terrestre è il prodotto delle interazioni e dei complessi meccanismi ciclici che regolano gli scambi di materia e di energia tra le componenti fisiche del *sistema climatico*: atmosfera, idrosfera, criosfera, litosfera e biosfera. I processi che avvengono all'interno di questo sistema non sono indipendenti tra loro, ma s'influenzano reciprocamente attraverso meccanismi di retroazione (*feedback*) che agiscono come regolatori interni del sistema, esercitando un'azione che può essere sinergica (*feedback positivo*) o di compensazione (*feedback negativo*) ai processi stessi.

La maggiore sorgente di energia del sistema è la radiazione solare che raggiunge l'atmosfera e dopo essere stata assorbita principalmente dalla superficie terrestre, viene riemessa verso lo spazio come radiazione termica. Il clima rappresenta la manifestazione dell'equilibrio raggiunto dal sistema in seguito al bilancio tra energia entrante e uscente e alle risposte dei *feedback* interni ed è quindi evidente come un qualunque fattore in grado di alterare questo bilancio termico possa influenzare il clima globale.

La moderna climatologia considera il clima non come un elemento statico ma dinamico e in continua evoluzione a causa di fattori che possono essere di origine naturale o antropica, esterni o interni al sistema climatico. Essenzialmente questi possono essere:

- Fattori astronomici in grado di influenzare la quantità di radiazione solare che giunge alla Terra (variazione dei parametri orbitali e della Costante Solare).
- Fattori geologici che modificano l'aspetto della superficie terrestre, la disposizione dei continenti e la forma dei bacini oceanici (attività tettonica).
- Cambiamenti di concentrazione nell'atmosfera dei gas serra e degli aerosol (vulcanismo, emissioni antropiche).
- Processi di variabilità interna del sistema climatico che possono alterare i modi attraverso i quali la radiazione solare è ripartita e immagazzinata tra le varie componenti del sistema.

L'influenza degli agenti esterni sul clima può essere descritta quantitativamente introducendo il concetto di *agente forzante radiativo*,

termine che descrive il contributo energetico in W/m^2 introdotto dal forzante considerato nell'atmosfera terrestre.

Il cambiamento climatico attualmente in corso è il più rapido osservato negli ultimi 1000 anni e sulla base degli studi effettuati da circa 2500 scienziati, l'IPCC desume che il riscaldamento globale è inequivocabile ed in gran parte determinato dalle emissioni antropiche di gas serra iniziate dopo l'Era Industriale. Nel *Quarto Rapporto di Valutazione* [IPCC, WG1 AR4 2007] è stimato con confidenza molto alta (almeno 9 su 10 possibilità di essere corretto) che l'effetto globale medio netto delle attività umane dal 1750 ad oggi sia stato una causa di riscaldamento, con un forzante radiativo pari a $+ 1,6 W/m^2$. Lo sviluppo e l'utilizzo di modelli numerici di simulazione sono pertanto indispensabili per indagare i meccanismi che regolano il sistema climatico, per quantificare gli impatti delle attività antropiche e per mostrare gli sviluppi futuri dei cambiamenti che sappiamo essere in atto.

3. Il modello EBU-POM

La simulazione utilizzata in questo studio è stata eseguita con il modello regionale accoppiato oceano-atmosfera EBU-POM (CRCM), in cui la componente atmosferica è il modello ETA sviluppato all'Università di Belgrado e la componente oceanica è il Princeton Ocean Model (POM). Entrambi i modelli sono ben conosciuti e sono stati ampiamente verificati, infatti ETA è stato utilizzato fino al Giugno del 2006 come modello numerico di previsione meteorologica (NWP) presso il *National Center for Environmental Prediction* (NCEP, USA) e POM è uno dei modelli più usati sia per scopi di ricerca scientifica che per previsioni oceaniche operative [Djurdjevic e Rajkovic, 2008]. L'accoppiamento delle due componenti significa che la parte marina del modello è dinamica e trasmette/riceve informazioni in continuo con la parte atmosferica. L'utilizzo di EBU-POM per simulazioni climatologiche e per lo studio dei cambiamenti climatici s'inserisce all'interno del progetto SINTA, cui partecipano l'Istituto

Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV, Italia) e due Istituti Serbi: il Servizio Idro-Meteorologico della Repubblica Serba (RHSS) e L'Università di Belgrado (UB). Scopo del progetto è lo studio del clima e dei cambiamenti climatici nella regione del Mediterraneo tramite modelli regionali ad alta risoluzione innestati in modelli climatici di circolazione globale. La tecnica di riduzione di scala dinamica (*dynamical downscaling*) prevede l'utilizzo dell'AOGCM SINTEX-G [SXG, Gualdi et al. 2008] sviluppato presso l'INGV per descrivere le risposte del clima ai forzanti su scala planetaria e ottenere così le informazioni necessarie per fornire le condizioni iniziali e al contorno a EBU-POM. Il modello atmosferico regionale ha risoluzione orizzontale di 0.25° di latitudine e longitudine corrispondente a un reticolo di calcolo di circa 30 Km per 30 Km, ed il suo dominio è illustrati in figura 2.

In questo lavoro l'analisi è stata compiuta su quattro variabili atmosferiche:

- La temperatura dell'aria a 2 metri in $^{\circ}\text{K}$ (T2m)
- La pressione atmosferica a livello del mare in hPa (SLP)
- La componente zonale del vento a 10 metri in m/s (u10)
- La componente meridionale del vento a 10 metri in m/s (v10)

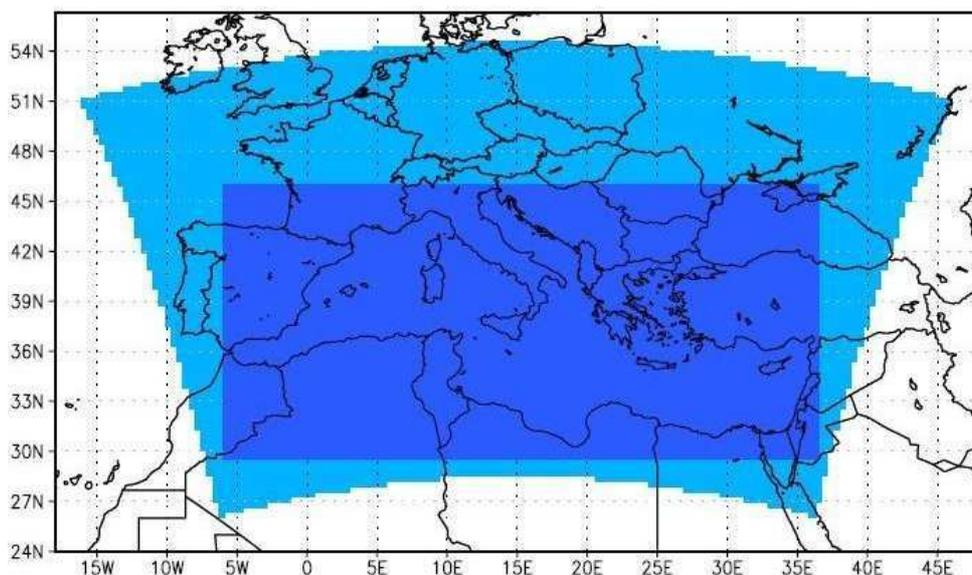


Fig. 2: Rappresentazione del dominio del modello. In azzurro il dominio della componente atmosferica ETA; in blu il dominio della componente oceanica POM. Le condizioni iniziali e a bordo griglia sono fornite dall'AOGCM SINTEX-G.

4. Validazione di EBU-POM

La validazione del modello è stata condotta confrontando i valori delle quattro variabili d'interesse (T2m, SLP, u10, v10) ottenuti dalle simulazioni con i dati provenienti dalle analisi e integrazioni di ECMWF, che rappresentano la miglior stima dello stato dell'atmosfera. ETA utilizza una griglia di Arakawa di tipo E con risoluzione orizzontale di 0.25° mentre ECMWF utilizza una griglia regolare con risoluzione di 0.5°, pertanto è stato necessario interpolare i campi del modello su griglia regolare e ridurre la risoluzione a 0.5°. In entrambi i *data-sets* i valori dei campi sono disponibili con frequenza temporale di sei ore ed il confronto è stato effettuato nel periodo che va dal 1 gennaio 2002 fino al 31 dicembre 2008, sull'area comune ai due domini di coordinate 6W-36E, 30N-48N.

L'errore è stato valutato utilizzando due indici statistici di qualità, BIAS e RMSE, che si basano sugli scarti tra valore previsto (EBU) e valore osservato (analisi ECMWF). Il BIAS (mean error o errore medio) è definito come la media aritmetica degli scarti:

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_i (Vp_i - Vo_i)$$

Il BIAS è un indicatore di un'eventuale distorsione nelle previsioni, evidenziando la tendenza alla sovrastima (BIAS positivo) o alla sottostima (BIAS negativo) nelle previsioni.

Il RMSE (root mean square error) è definito come la radice quadrata della media dei quadrati degli scarti:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i (Vp_i - Vo_i)^2}$$

Il RMSE è un indicatore dell'accuratezza delle previsioni e amplifica isolati valori previsti che abbiano presentato forti scostamenti rispetto a quelli osservati.

Il confronto è stato eseguito per T a due metri, per SLP e per il modulo del vento ($\sqrt{u10^2 + v10^2}$), per ogni punto griglia e per le medie di bacino a differenti scale temporali. Per quanto concerne il confronto delle medie di bacino, nell'analisi sono stati considerati solo i punti di mare per evitare che

la stima dell'errore fosse influenzata da aree su cui la simulazione del modello è meno accurata.

4.1 Confronto delle medie di bacino: T2m in °K

Il primo confronto è stato eseguito tra le medie di bacino a diverse scale temporali. Per ogni *timestep* di EBU e di ECMWF (frequenza temporale di 6 ore) è stato calcolato il valore medio di temperatura per i punti di mare della griglia ed in seguito i relativi BIAS e RMSE. A titolo di esempio è riportato in figura 3 l'andamento stagionale della temperatura, tipico delle medie latitudini, per l'anno 2002 ottenuto da simulazione con EBU-POM e da analisi di ECMWF.

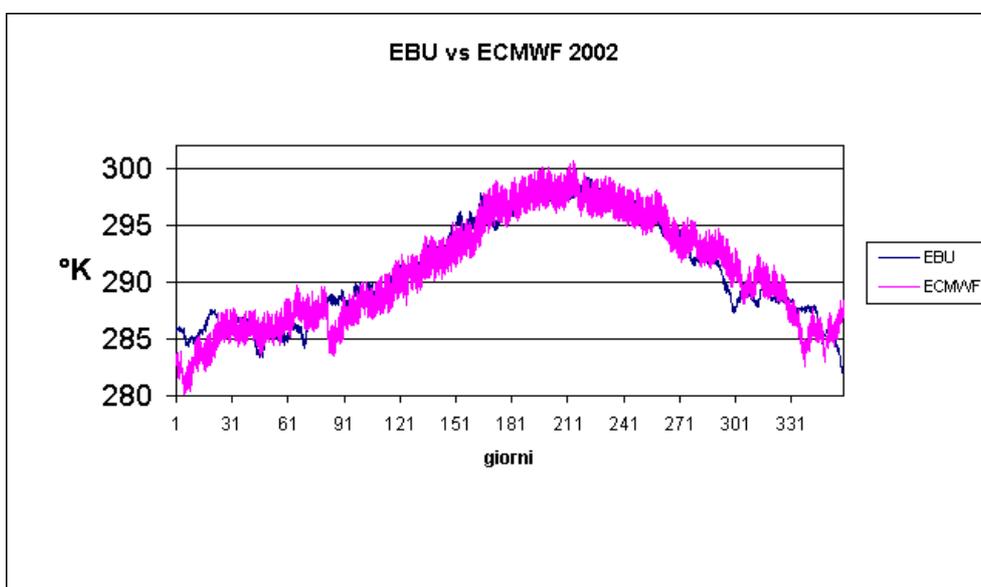
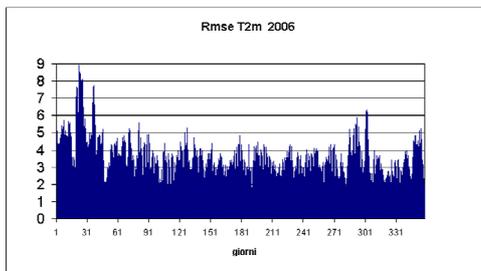
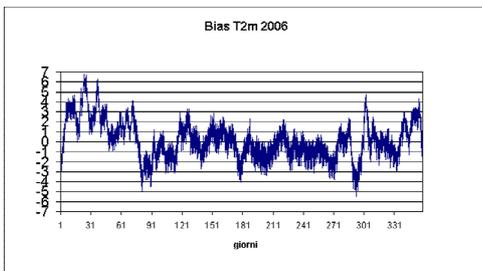
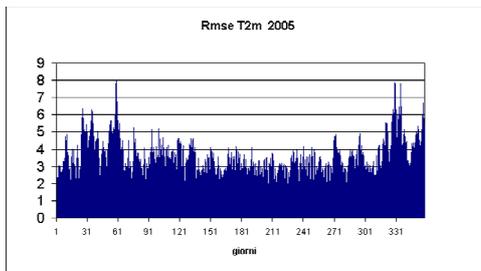
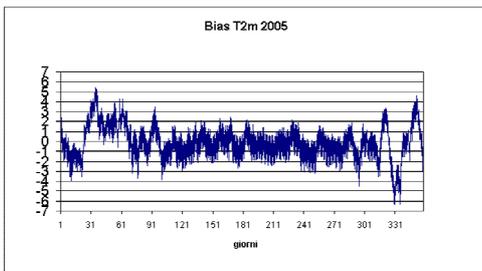
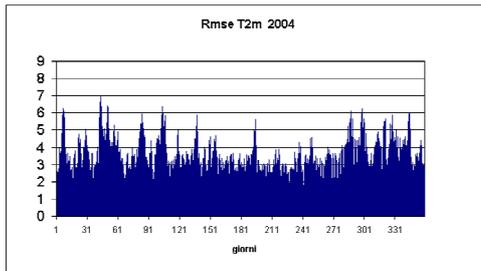
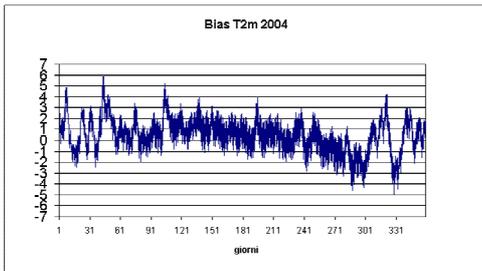
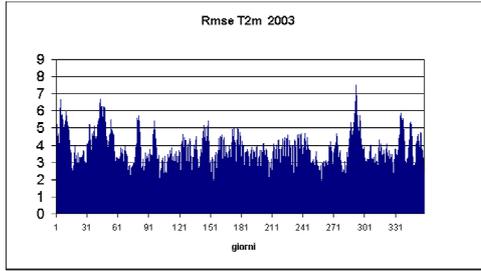
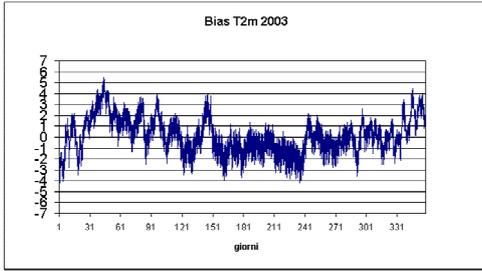
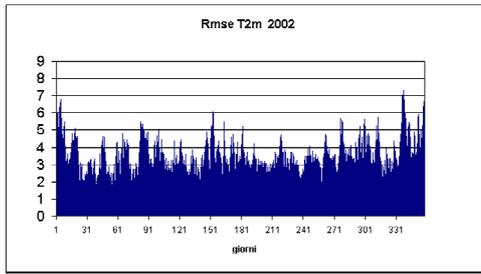
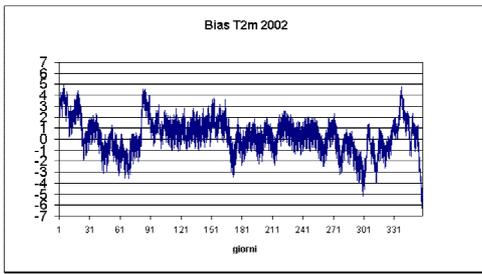
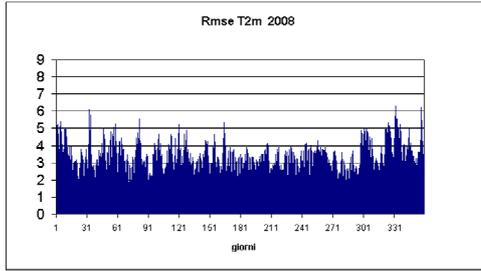
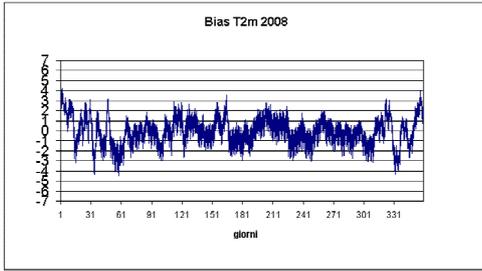
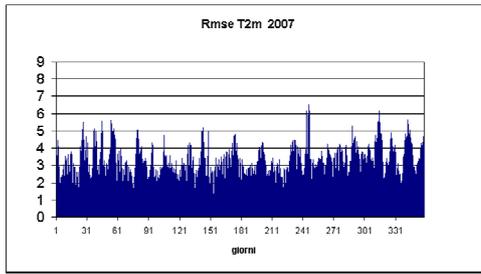
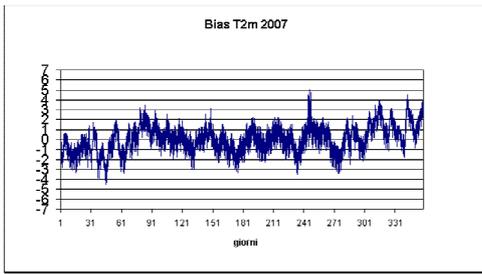


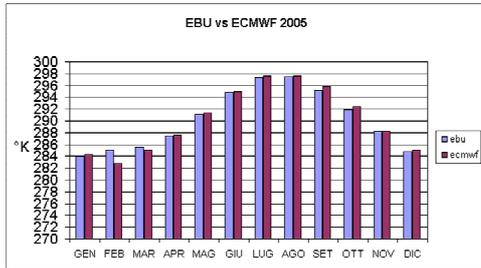
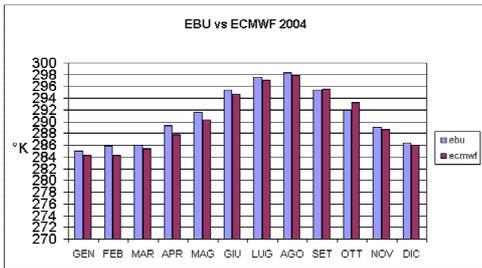
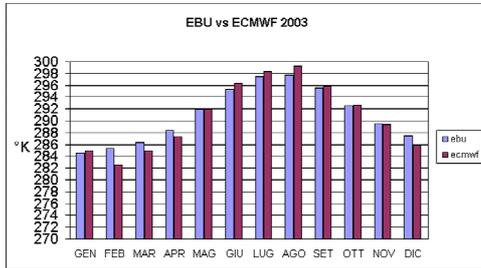
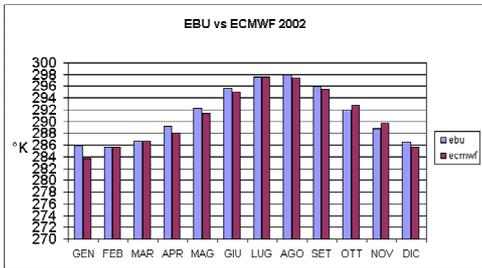
Fig. 3: Andamento stagionale della temperatura per l'anno 2002.

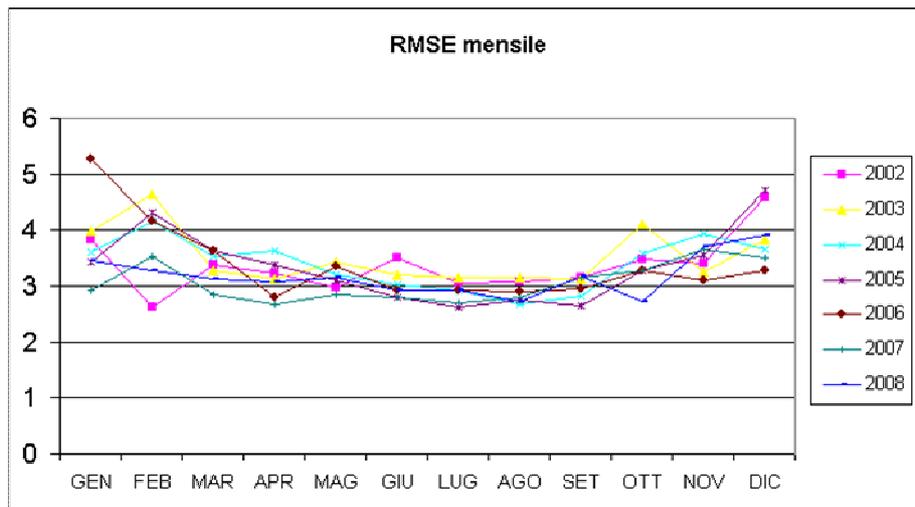
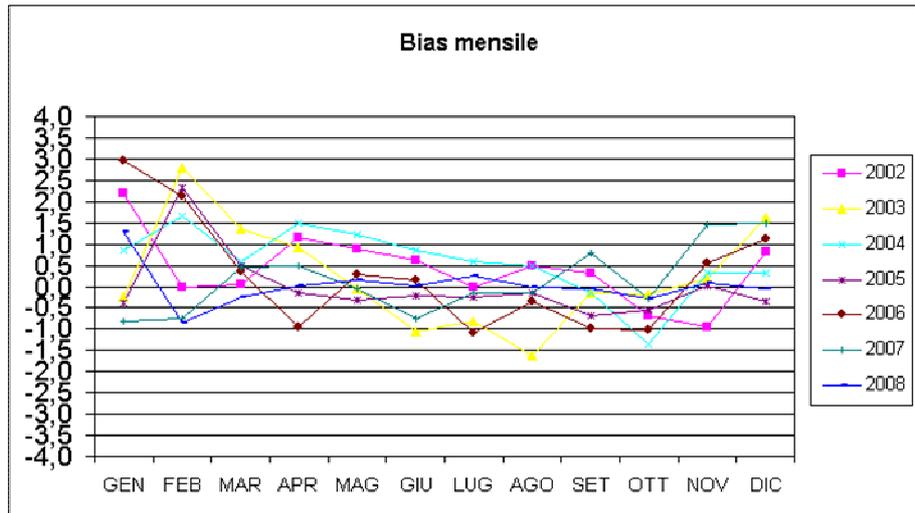
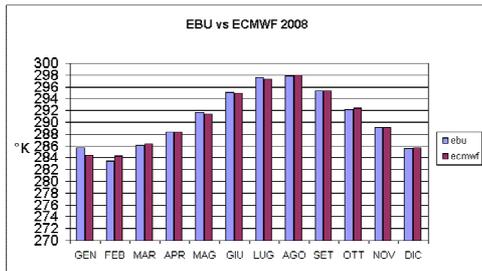
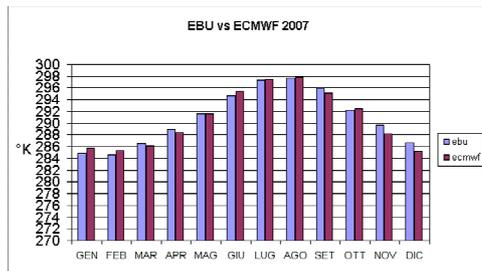
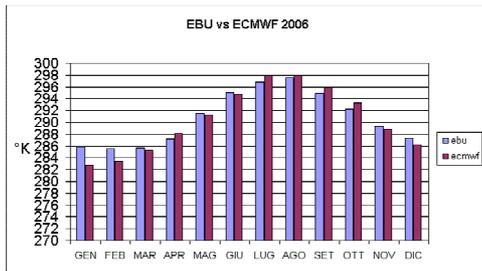
Nelle pagine successive vengono riportati i grafici di BIAS e RMSE calcolati ogni sei ore per ciascun anno.



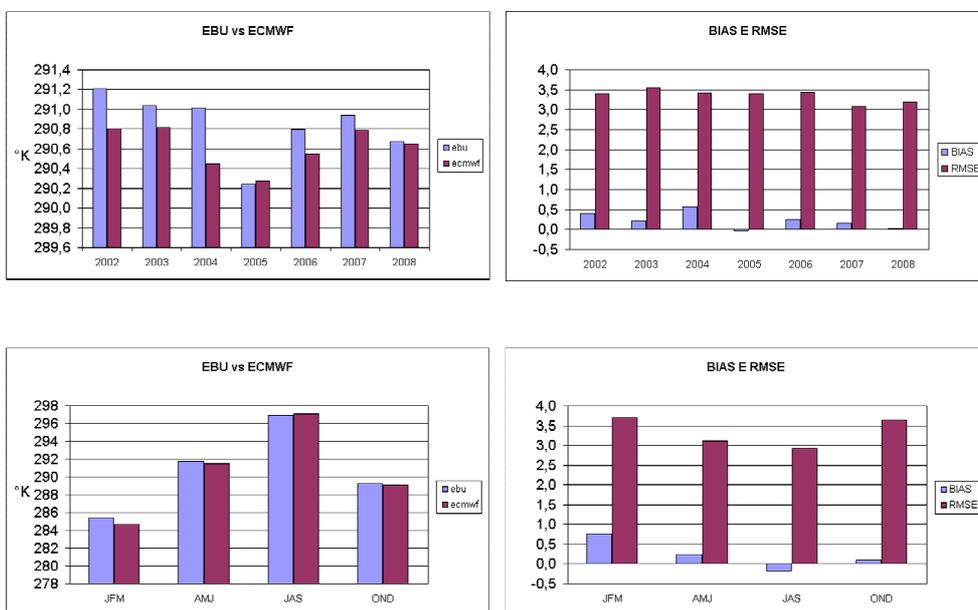


In seguito sono state calcolate le medie mensili dei valori della temperatura per ogni anno e i relativi BIAS e RMSE.





L'ultimo confronto è stato compiuto tra i valori medi annuali e tra i valori stagionali dell'intero periodo 2002-2008.



Vengono di seguito riportate le tabelle riassuntive dell'analisi condotta:

	EBU	ECMWF	BIAS	RMSE
2002	291,209	290,801	0,408	3,392
2003	291,035	290,818	0,217	3,543
2004	291,017	290,444	0,572	3,422
2005	290,243	290,275	-0,031	3,403
2006	290,796	290,542	0,254	3,441
2007	290,936	290,788	0,148	3,076
2008	290,677	290,650	0,028	3,198
Medie stagionali sull'intero periodo 2002-2008				
JFM	285,452	284,689	0,763	3,693
AMJ	291,718	291,490	0,228	3,114
JAS	296,889	297,067	-0,178	2,930
OND	289,218	289,108	0,111	3,633

Tab. 1: Valori medi della temperatura in °K previsti da EBU e osservati da ECMWF e relativi BIAS e RMSE.

4.2 Confronto delle medie di bacino: SLP in hPa

Anche per la pressione atmosferica al livello del mare è stata condotta un'analisi analoga a quella per la temperatura a due metri.

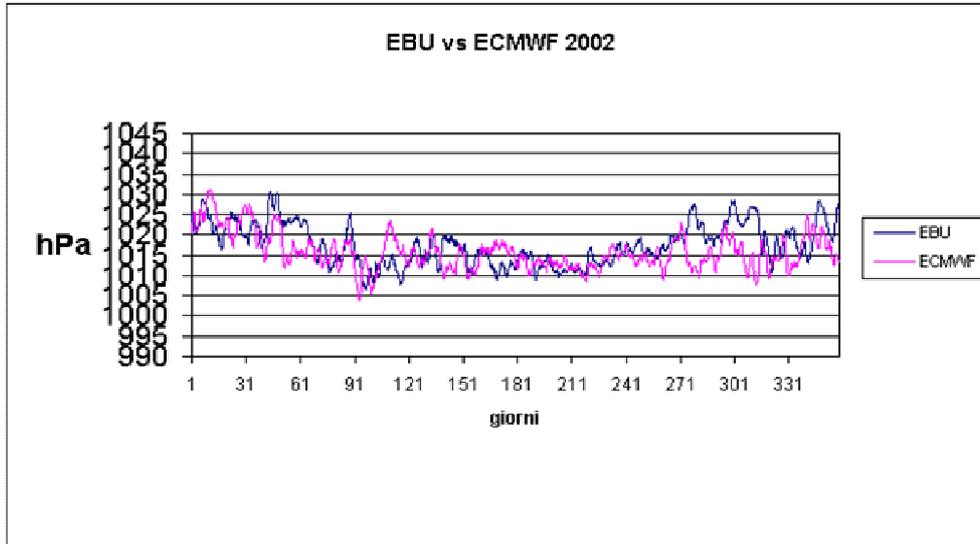
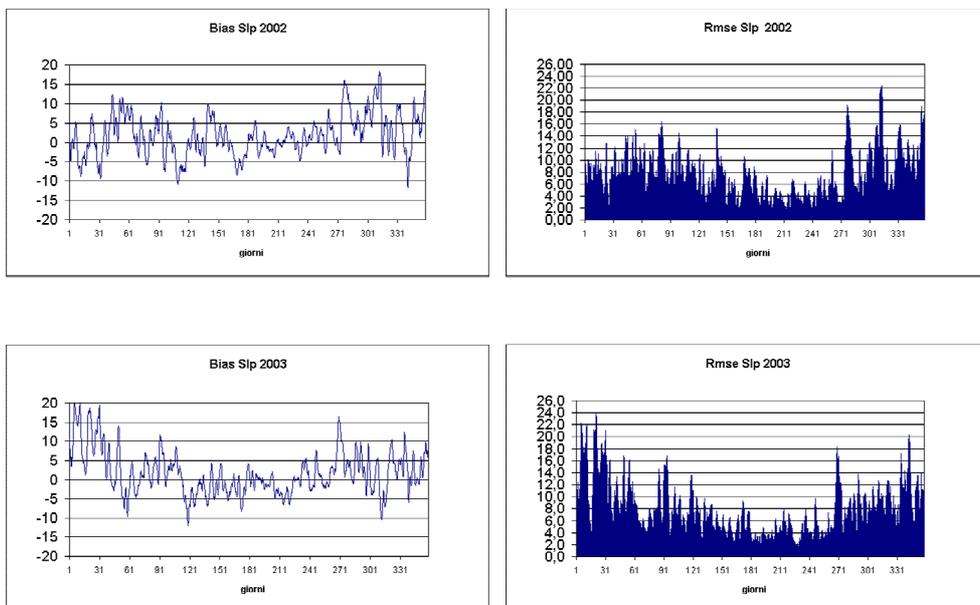
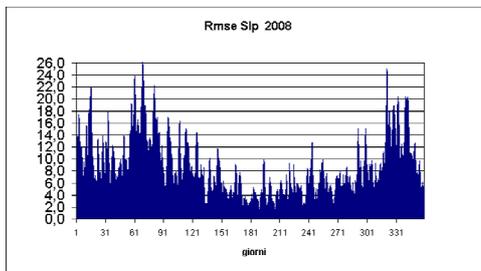
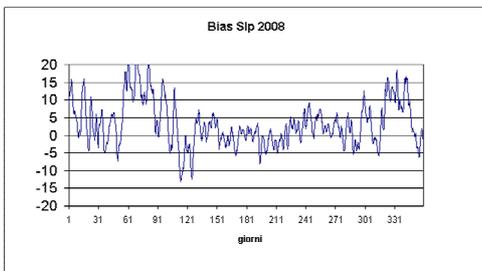
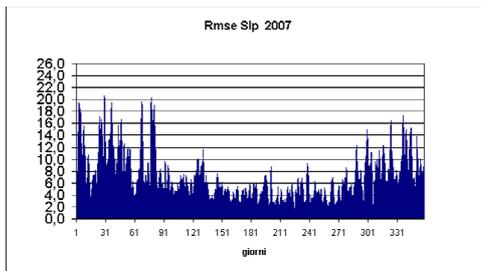
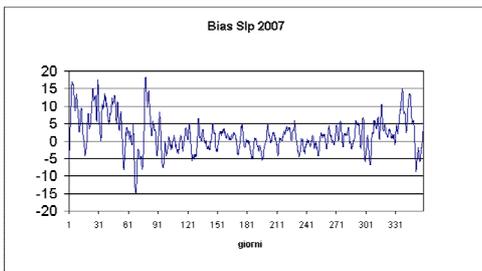
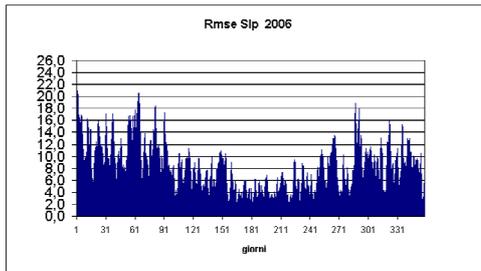
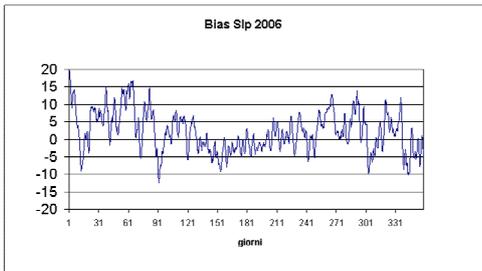
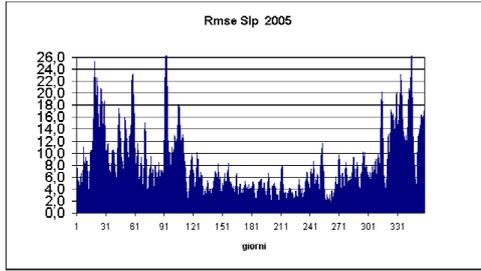
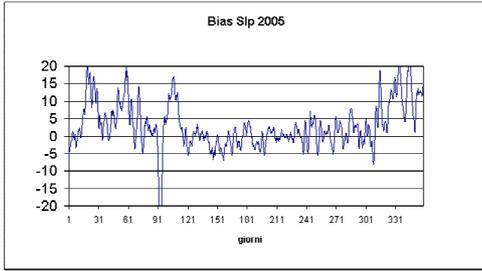
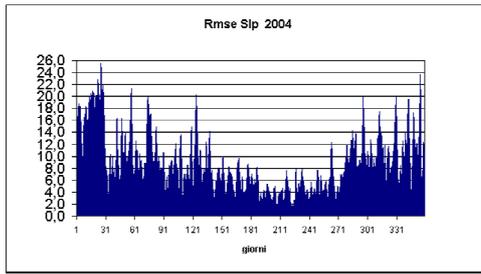
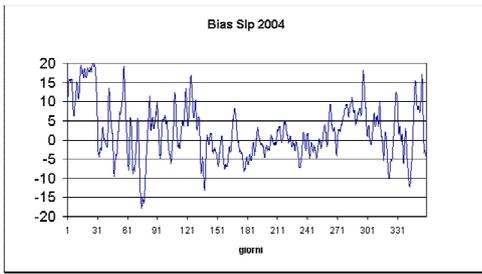


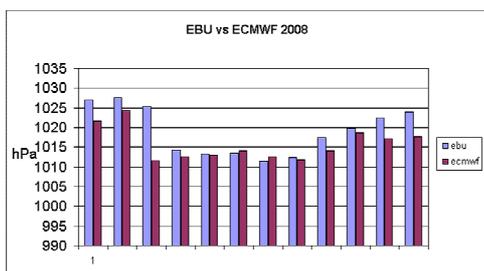
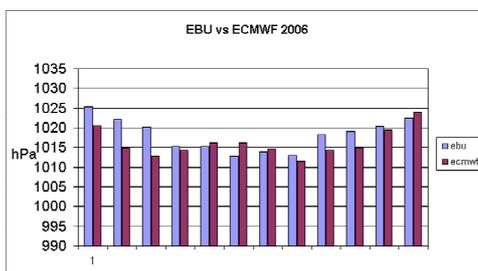
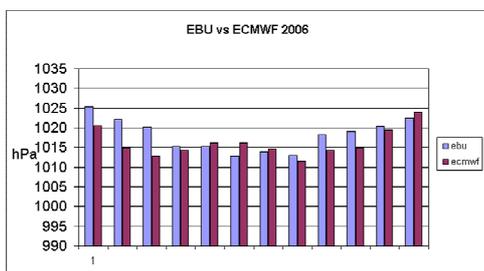
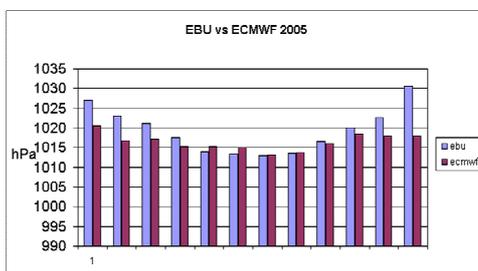
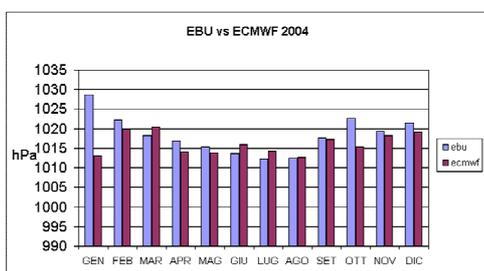
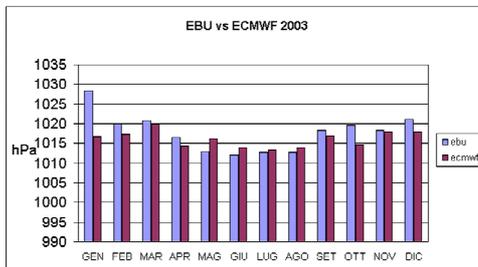
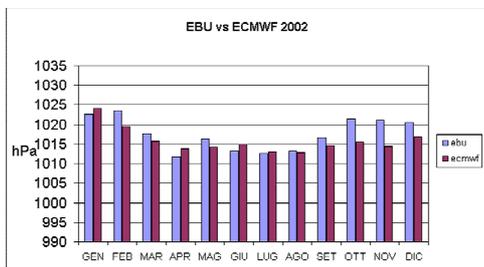
Fig. 4: Andamento della pressione atmosferica al livello del mare per l'anno 2002.

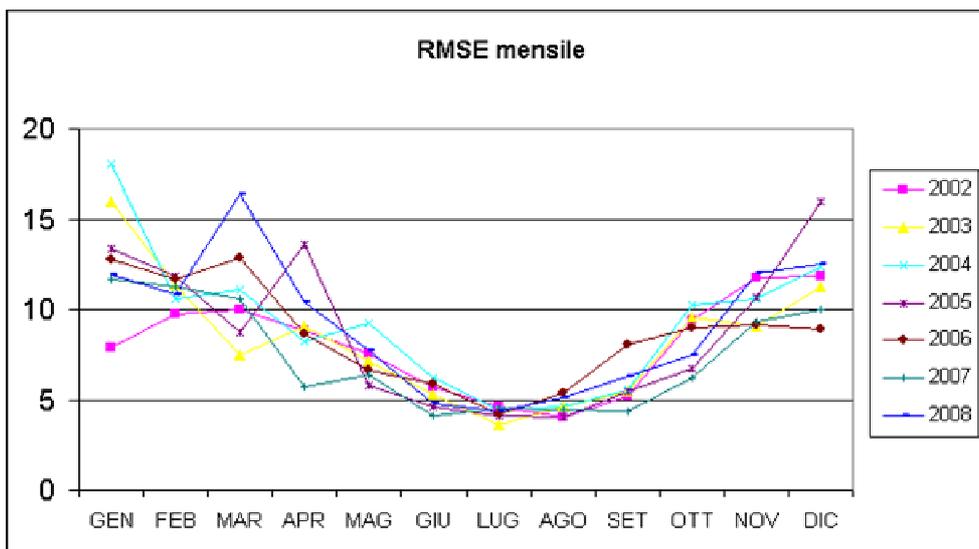
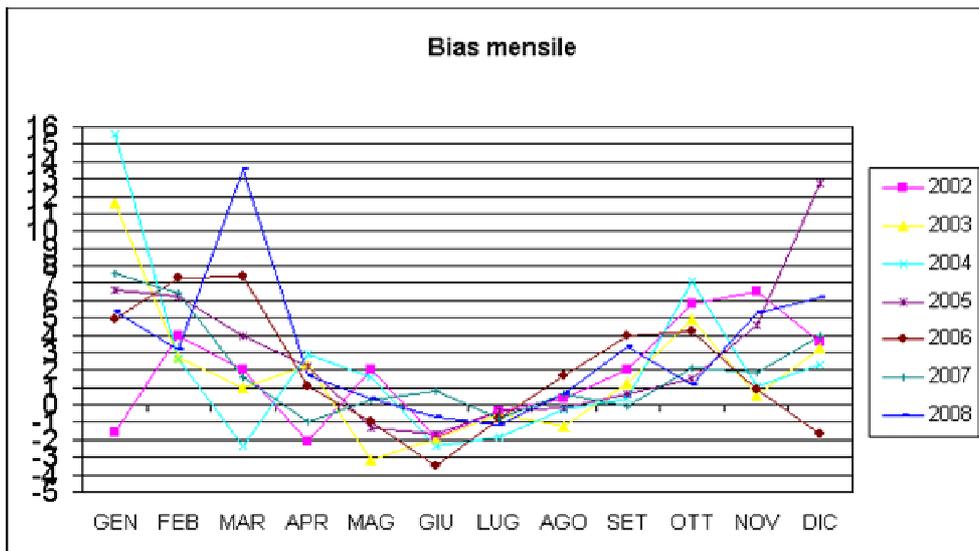
Seguono i grafici di BIAS e RMSE calcolati per i valori medi di SLP di EBU e di ECMWF con frequenza temporale di sei ore.



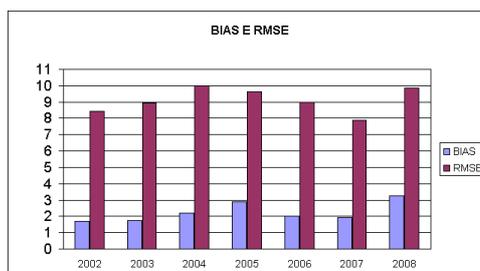
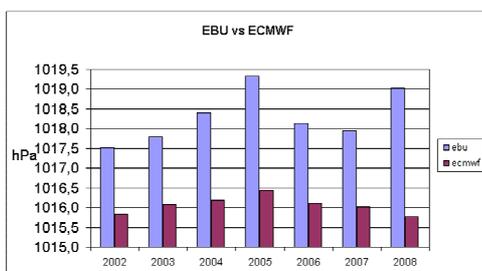


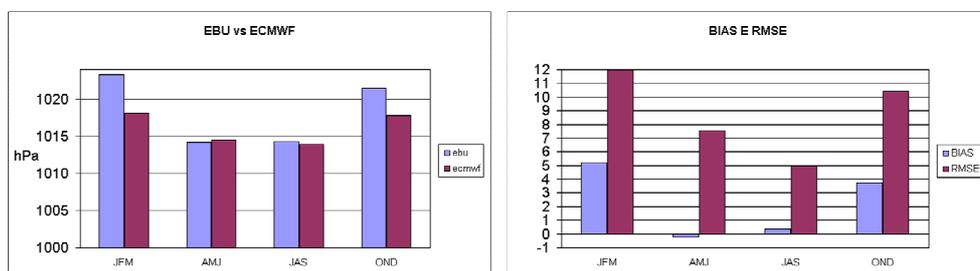
Nei grafici successivi sono rappresentati i valori medi mensili di SLP per ogni anno ed i relativi BIAS e RMSE.





Anche in questo caso l'ultimo confronto è stato compiuto tra i valori medi annuali e tra i valori medi stagionali calcolati per l'intero periodo di controllo.





	EBU	ECMWF	BIAS	RMSE
2002	1017,522	1015,830	1,693	8,447
2003	1017,802	1016,084	1,719	8,959
2004	1018,406	1016,187	2,219	9,993
2005	1019,333	1016,432	2,901	9,623
2006	1018,133	1016,124	2,009	8,992
2007	1017,946	1016,026	1,919	7,891
2008	1019,025	1015,782	3,242	9,834
Medie stagionali sull'intero periodo 2002-2008				
JFM	1023,336	1018,122	5,214	12,013
AMJ	1014,248	1014,504	-0,255	7,550
JAS	1014,264	1013,907	0,357	4,984
OND	1021,482	1017,771	3,711	10,421

Tab. 2: Valori medi della pressione atmosferica al livello del mare in hPa previsti da EBU e osservati da ECMWF e relativi BIAS e RMSE.

4.3 Confronto delle medie di bacino: Modulo del Vento in m/s

L'ultimo campo analizzato è quello del modulo del vento a dieci metri calcolato come radice della somma dei quadrati delle componenti zonale (u_{10}) e meridionale (v_{10}). Come per T2m e SLP lo studio dell'errore è stato condotto a differenti scale temporali, e BIAS e RMSE sono stati calcolati per il valore medio ogni sei ore, per il valore medio mensile di ciascun anno

ed infine per il valore medio stagionale calcolato per l'intero periodo 2002-2008.

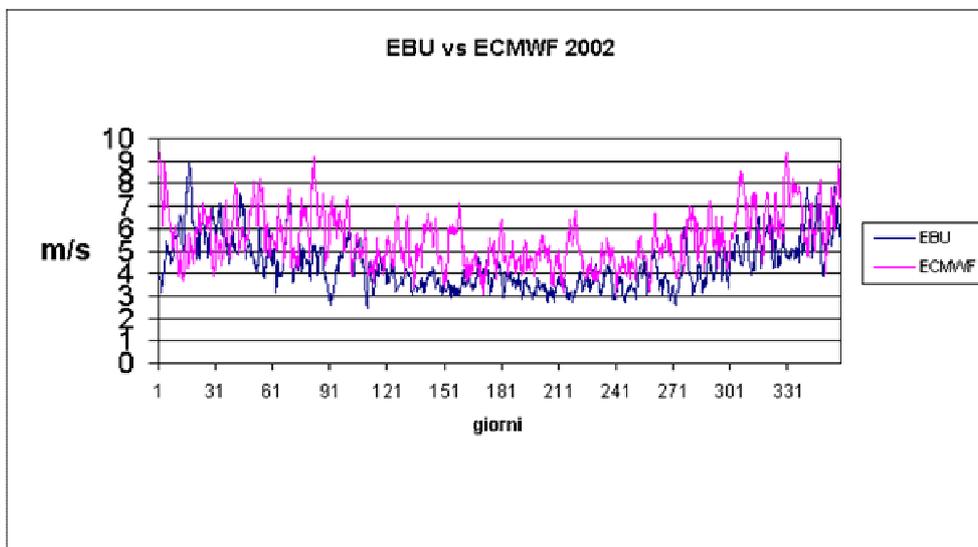
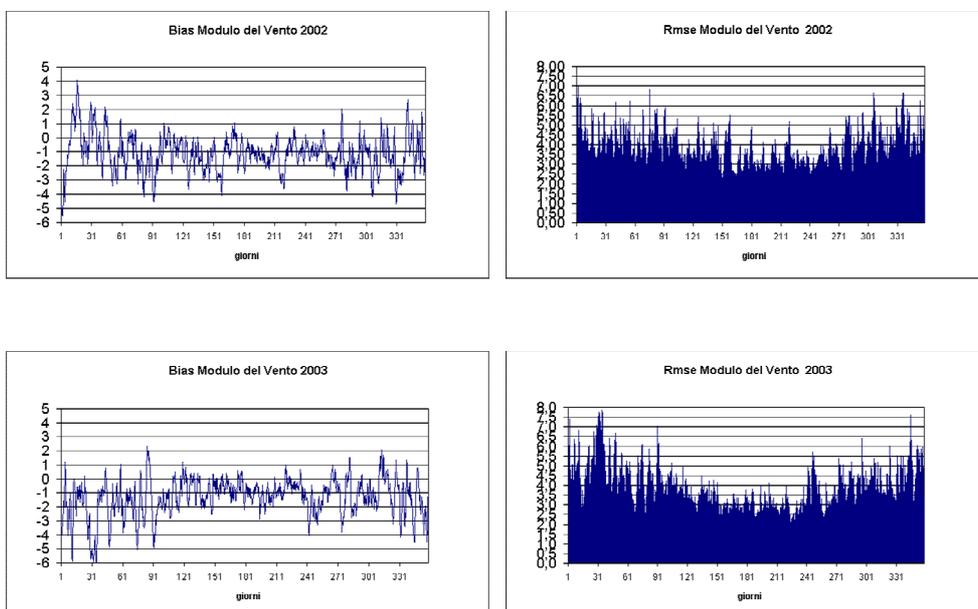
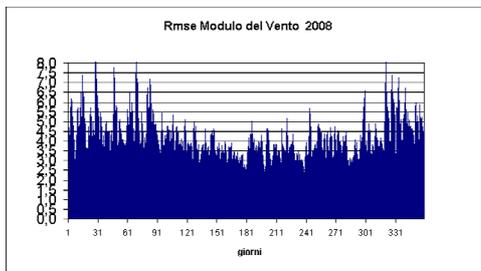
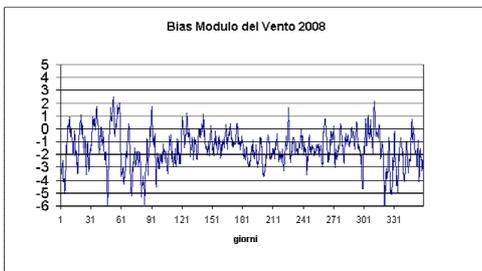
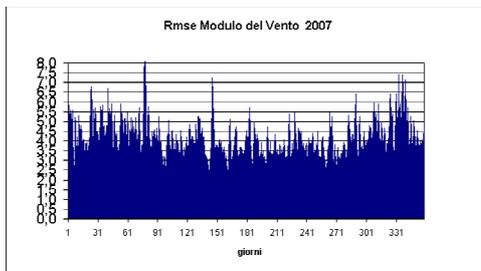
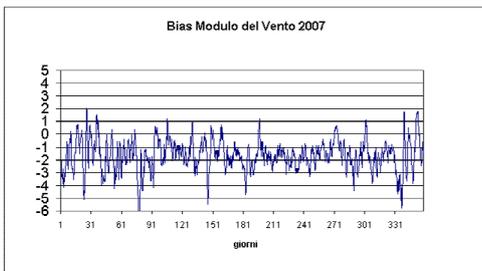
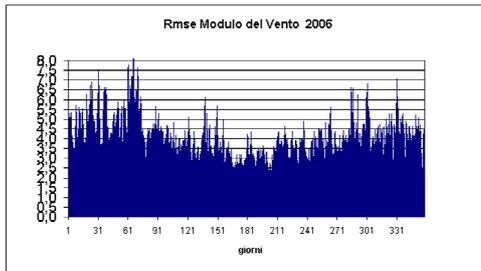
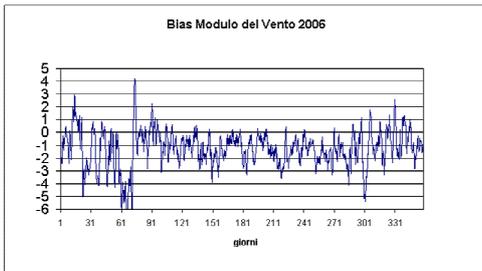
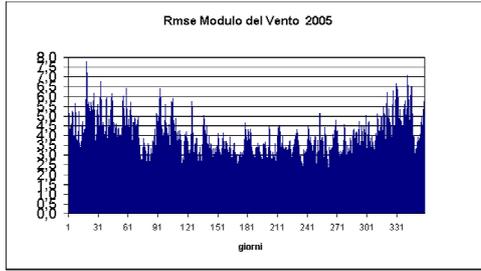
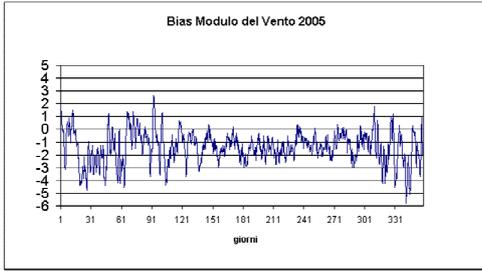
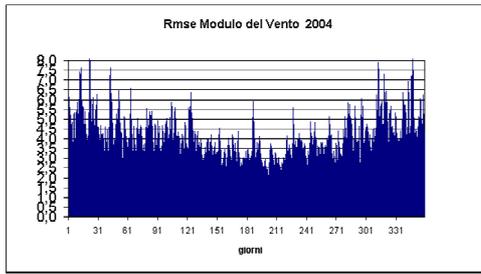
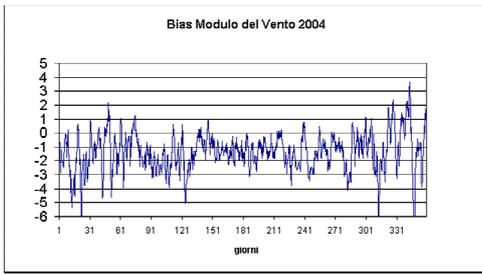


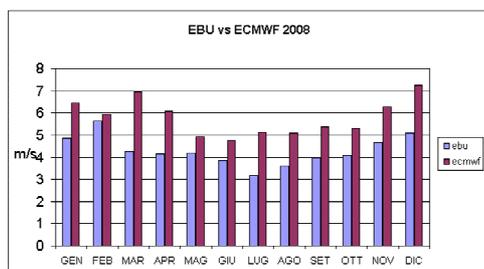
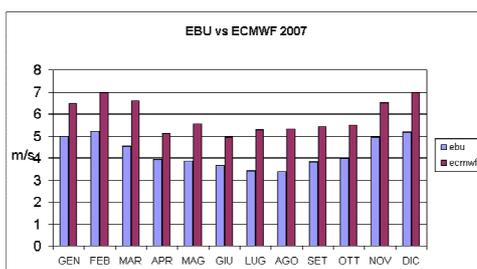
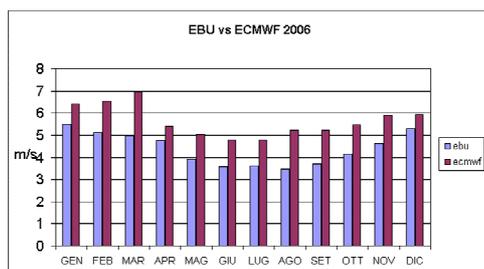
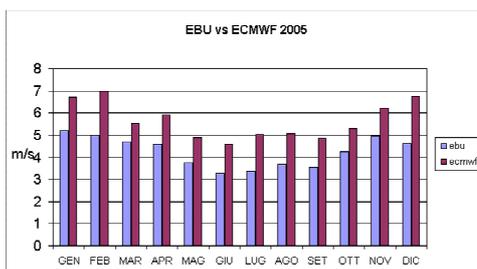
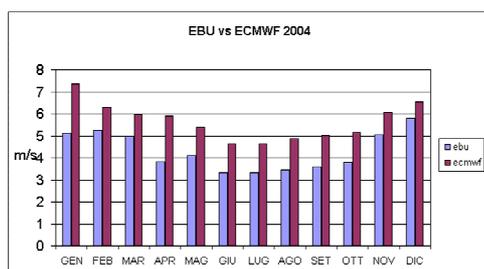
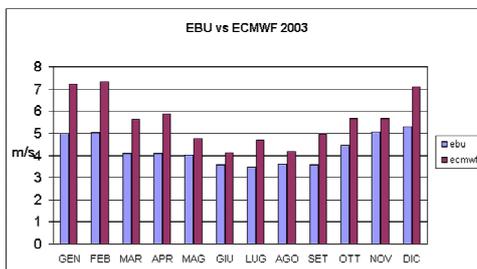
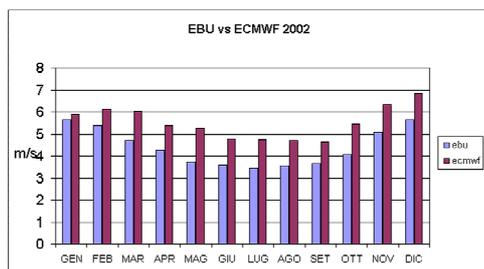
Fig. 5: Andamento del modulo del vento per l'anno 2002.

Grafici di BIAS e RMSE calcolati per i punti di mare del bacino con frequenza temporale di sei ore:

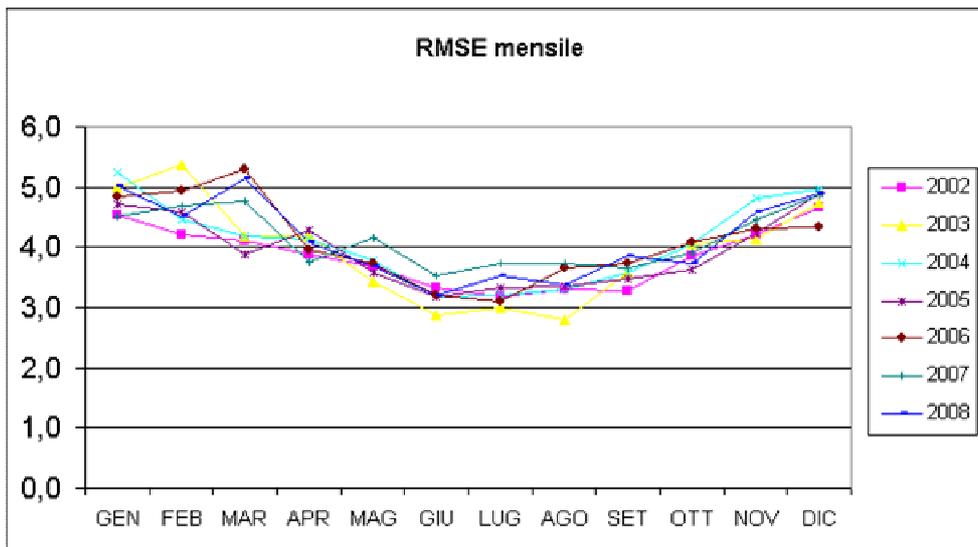
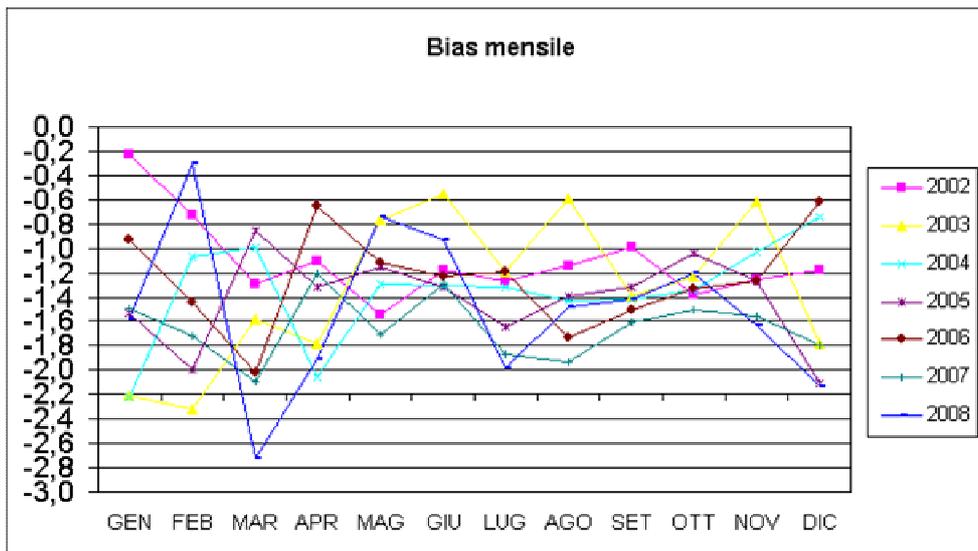




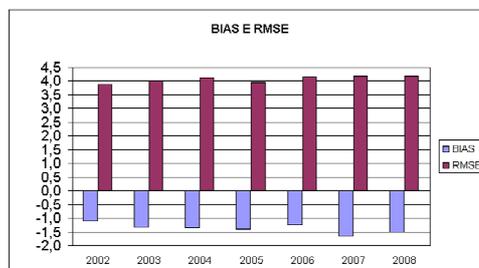
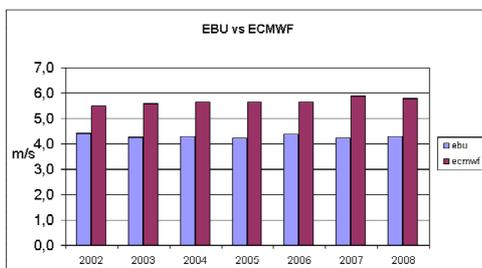
Grafici del valore medio mensile del modulo del vento per EBU e ECMWF:

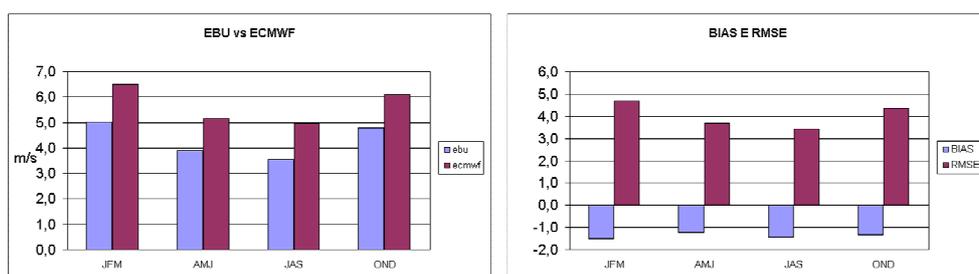


Nella pagina seguente sono riportati i grafici di BIAS e RMSE calcolati per i valori medi mensili del modulo del vento per ciascun anno del periodo di interesse.



Grafici raffiguranti il valore medio annuale e stagionale del modulo del vento e relativi BIAS e RMSE:





I risultati ottenuti dall'analisi dell'errore sono schematizzati nella tabella 3.

	EBU	ECMWF	BIAS	RMSE
2002	4,404	5,513	-1,108	3,883
2003	4,264	5,592	-1,328	4,012
2004	4,302	5,652	-1,351	4,134
2005	4,241	5,650	-1,409	3,963
2006	4,390	5,641	-1,251	4,143
2007	4,236	5,883	-1,648	4,172
2008	4,288	5,795	-1,507	4,187
Medie stagionali sull'intero periodo 2002-2008				
JFM	5,005	6,496	-1,491	4,694
AMJ	3,906	5,152	-1,245	3,679
JAS	3,548	4,968	-1,420	3,426
OND	4,769	6,102	-1,333	4,373

Tab. 3: Valori medi del modulo del vento in m/s previsti da EBU e osservati da ECMWF e relativi BIAS e RMSE.

4.4 Validazione del modello: Mappe

Per verificare la distribuzione spaziale dell'errore del modello EBU-POM è stata eseguita un'analisi punto per punto dei campi di maggiore interesse: la temperatura dell'aria a due metri e le componenti del vento a dieci metri. In questo caso si è scelto di eseguire il confronto tra i valori medi annuali e tra i valori medi stagionali per il periodo 2002-2008.

Nelle figure successive sono illustrati i risultati ottenuti.

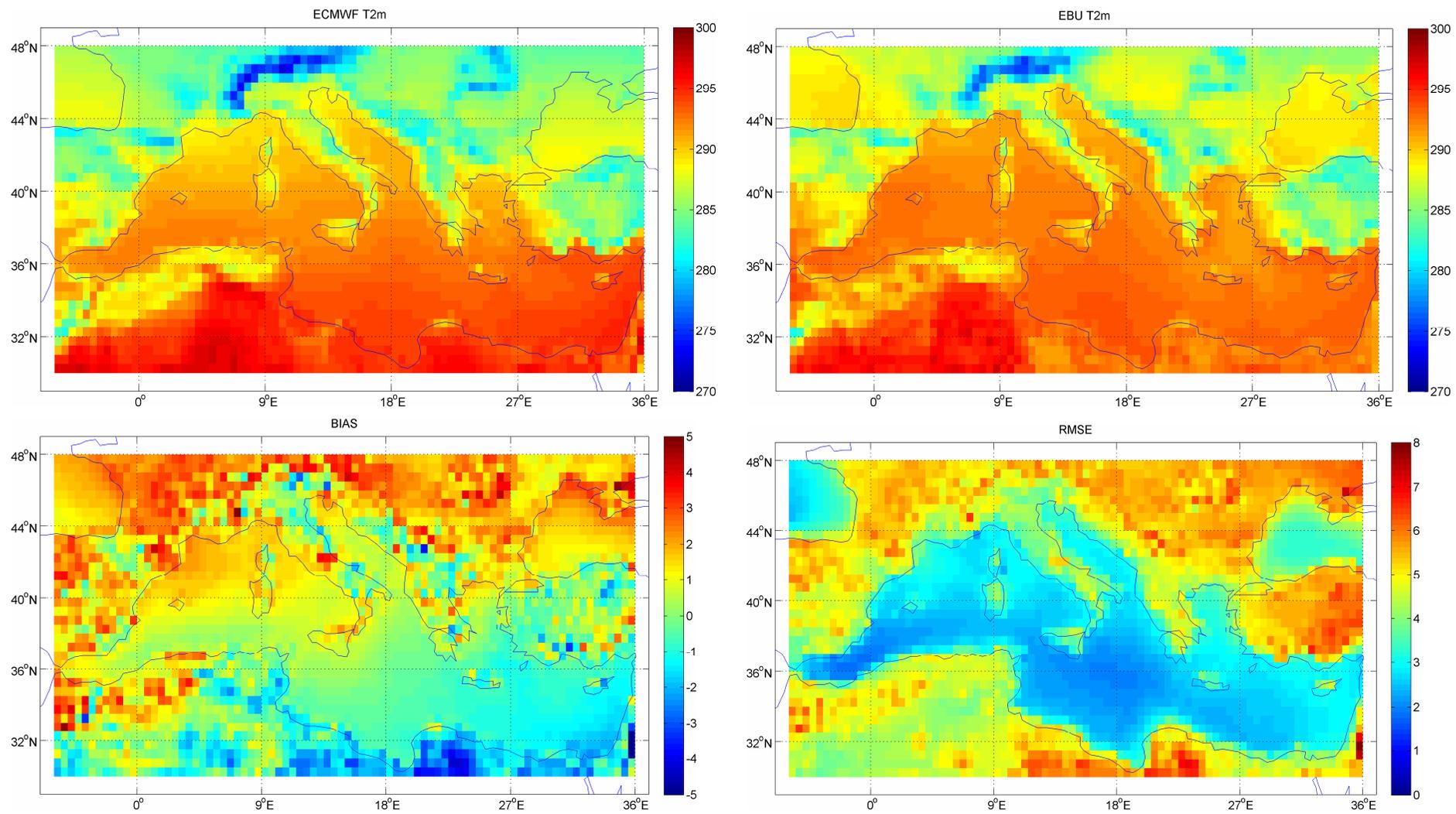


Fig. 6: Mappe dei valori di T2m in K per ECMWF, EB U e relativi BIAS e RMSE per l'anno 2002.

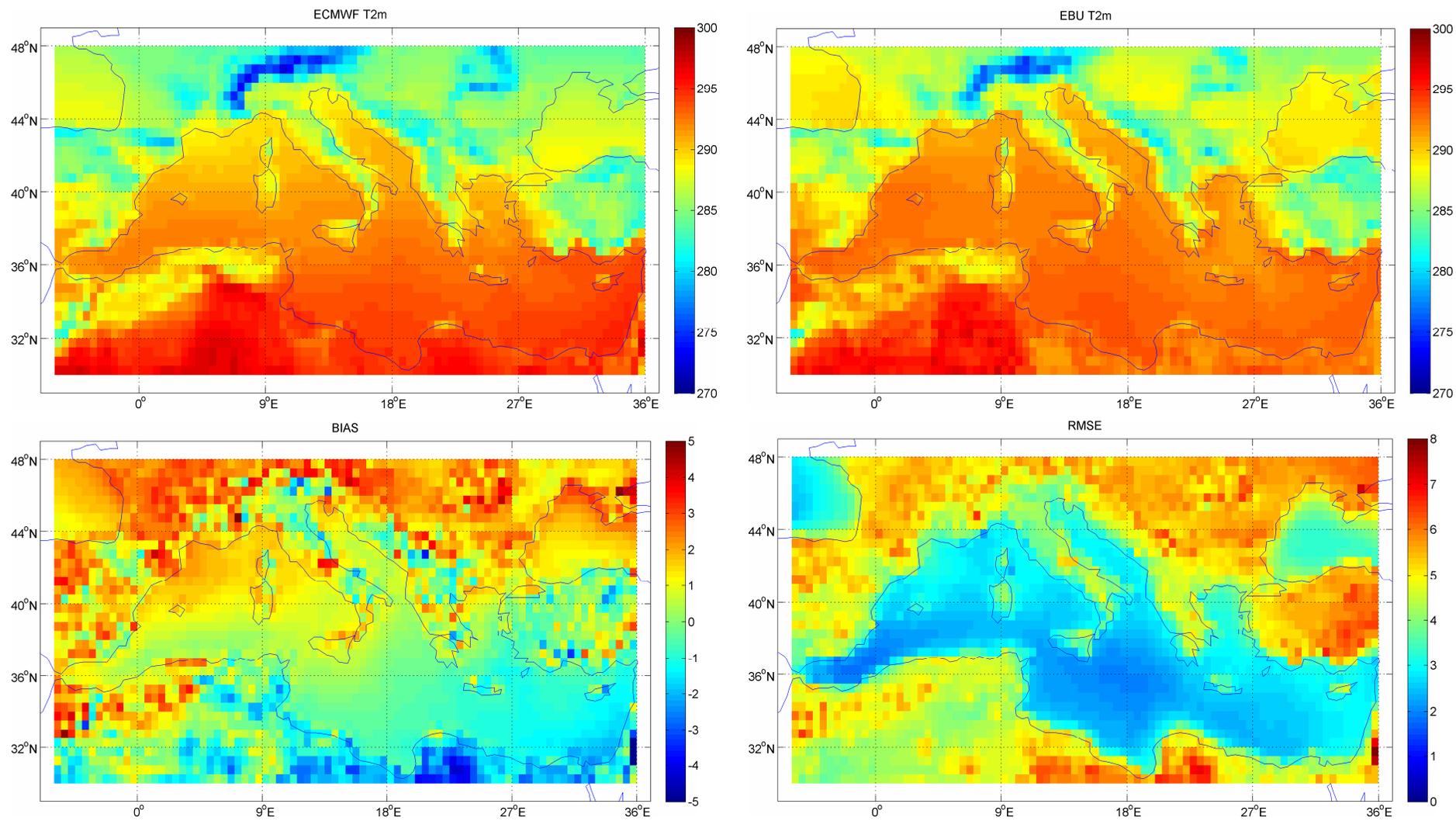


Fig. 7: Mappe dei valori di T2m in K per ECMWF, EB U e relativi BIAS e RMSE per l'anno 2003.

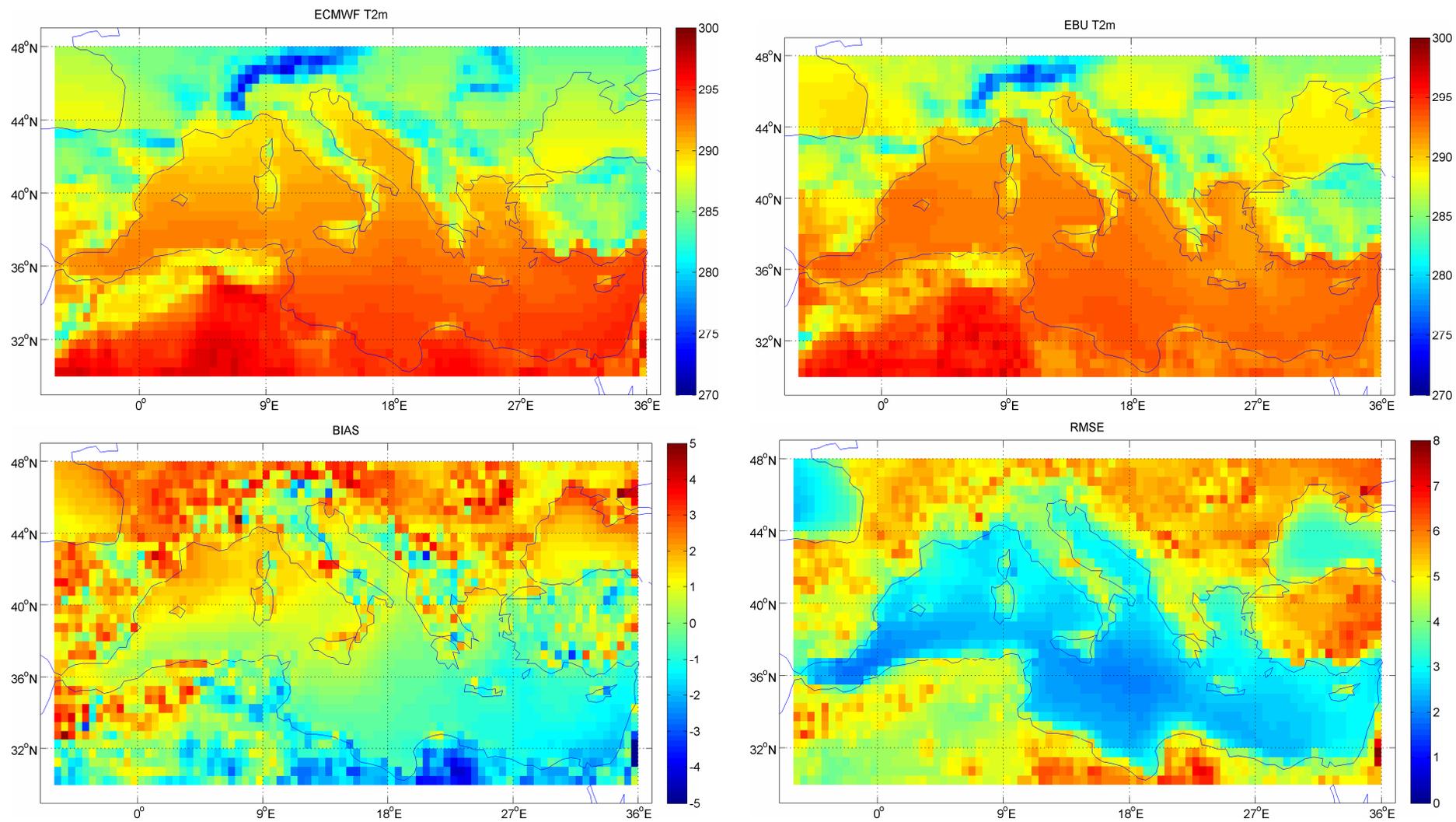


Fig. 8: Mappe dei valori di T2m in K per ECMWF, EB U e relativi BIAS e RMSE per l'anno 2004.

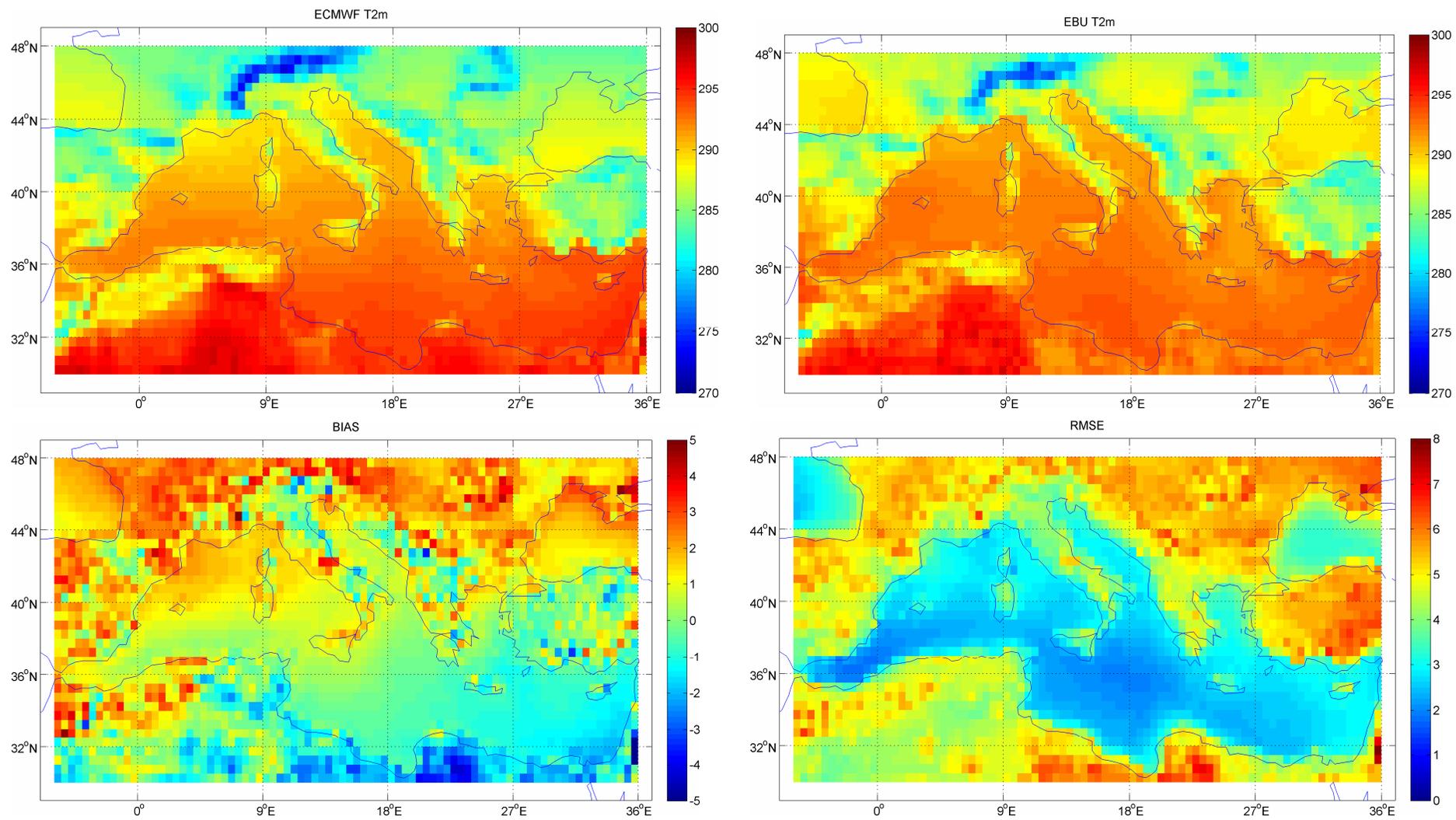


Fig. 9: Mappe dei valori di T2m in K per ECMWF, EB U e relativi BIAS e RMSE per l'anno 2005.

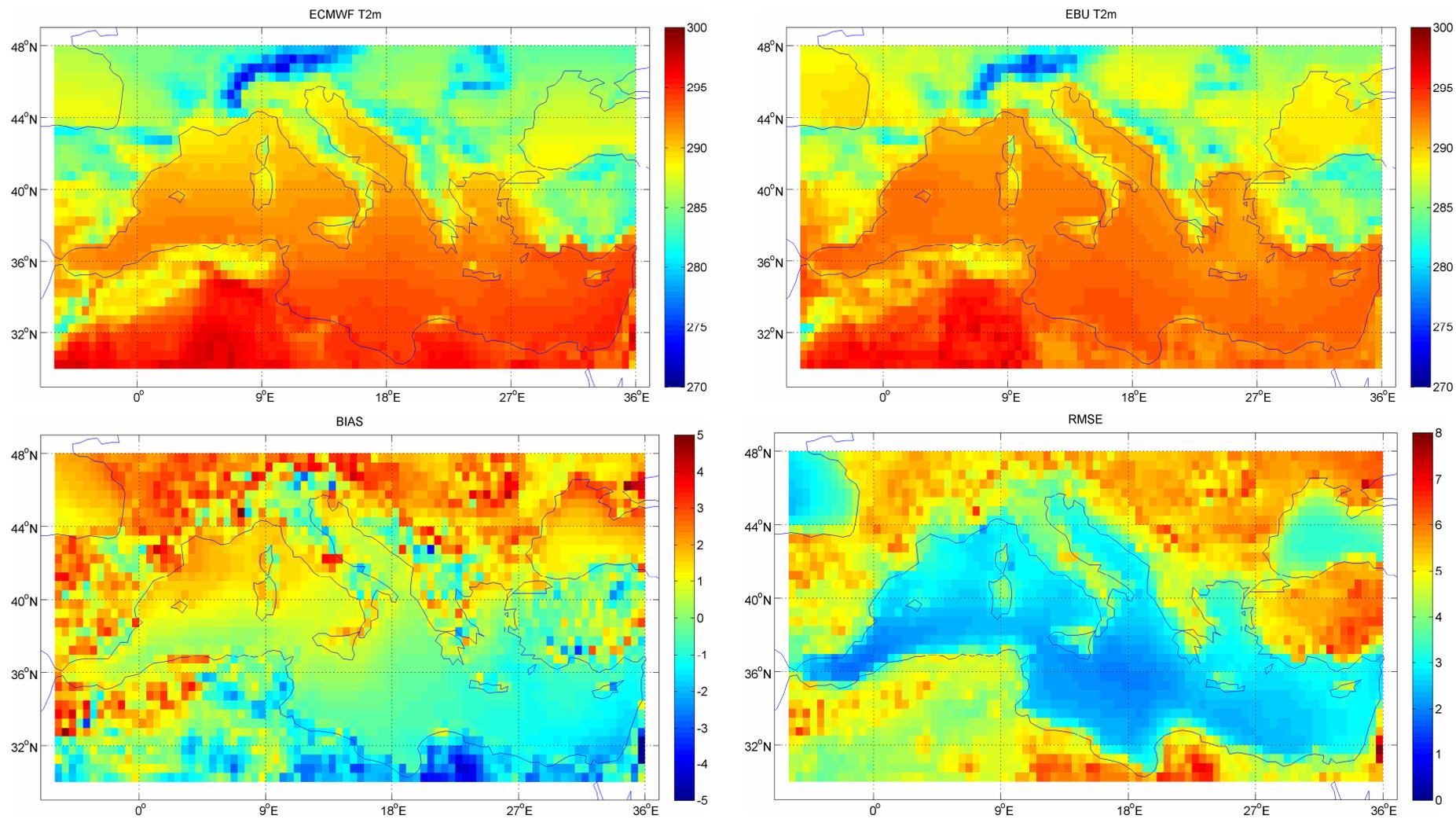


Fig. 10: Mappe dei valori di T2m in °K per ECMWF, E BU e relativi BIAS e RMSE per l'anno 2006.

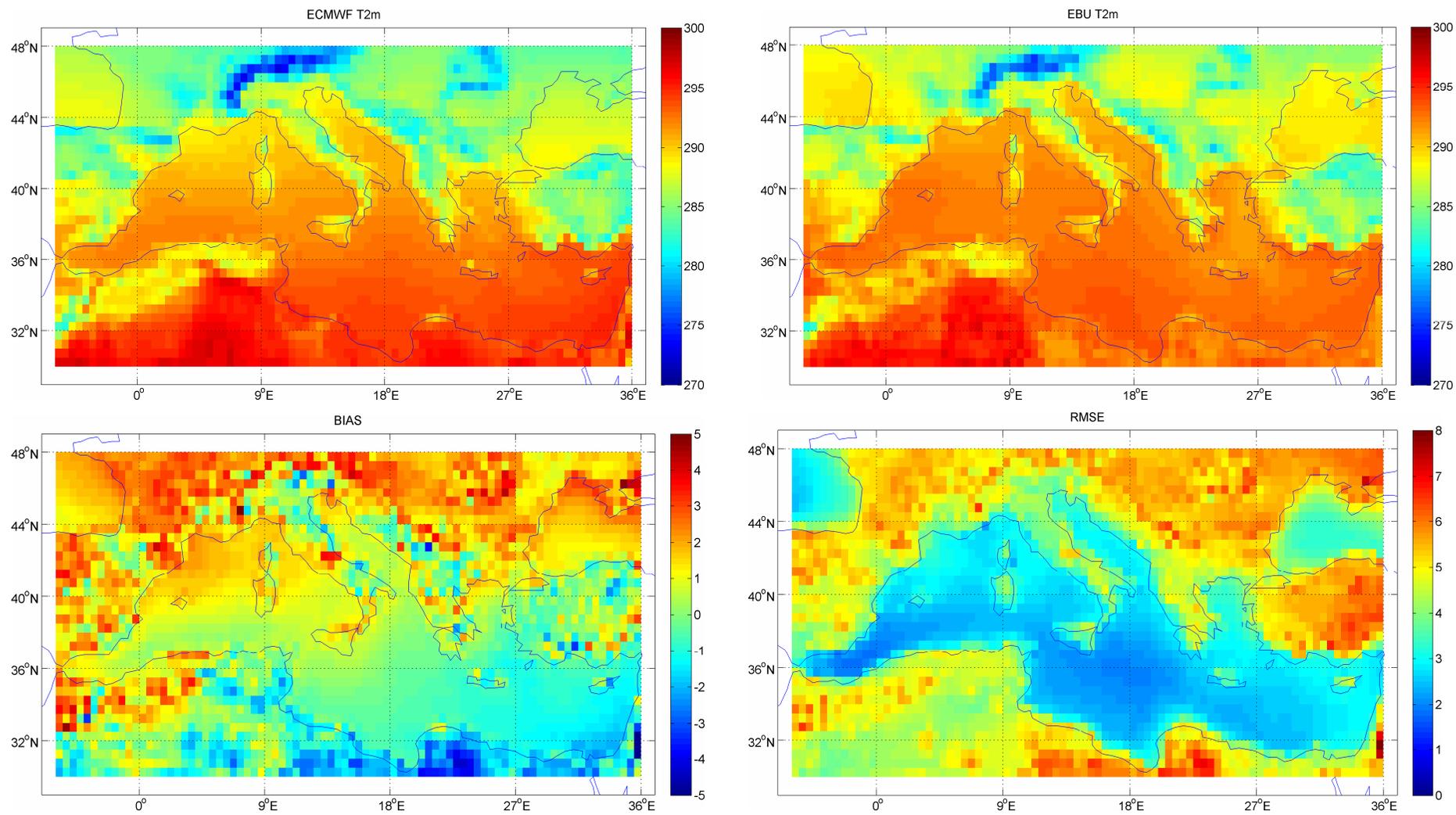


Fig. 11: Mappe dei valori di T2m in °K per ECMWF, E BU e relativi BIAS e RMSE per l'anno 2007.

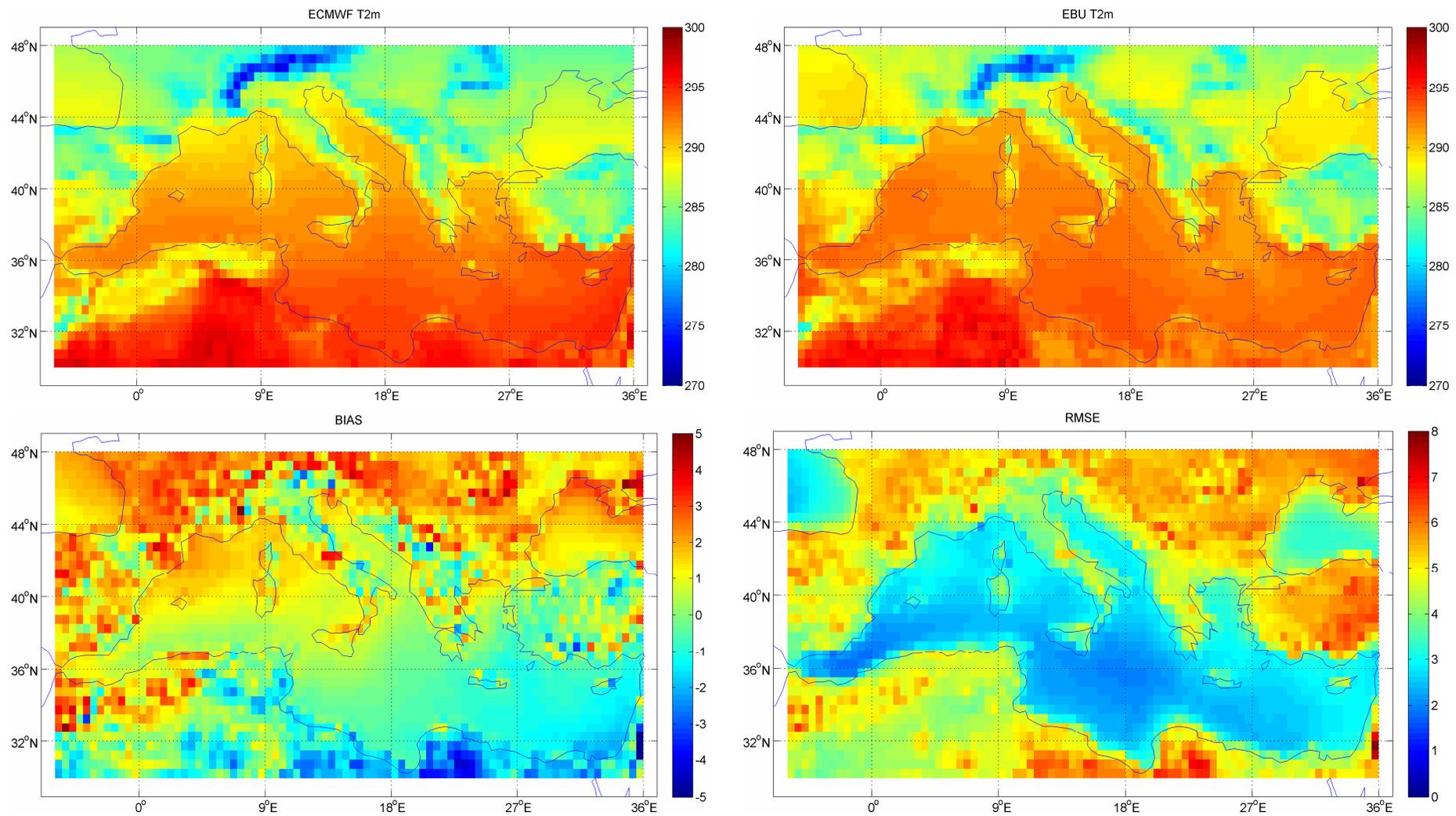


Fig. 12: Mappe dei valori di T2m in °K per ECMWF, E BU e relativi BIAS e RMSE per l'anno 2008.

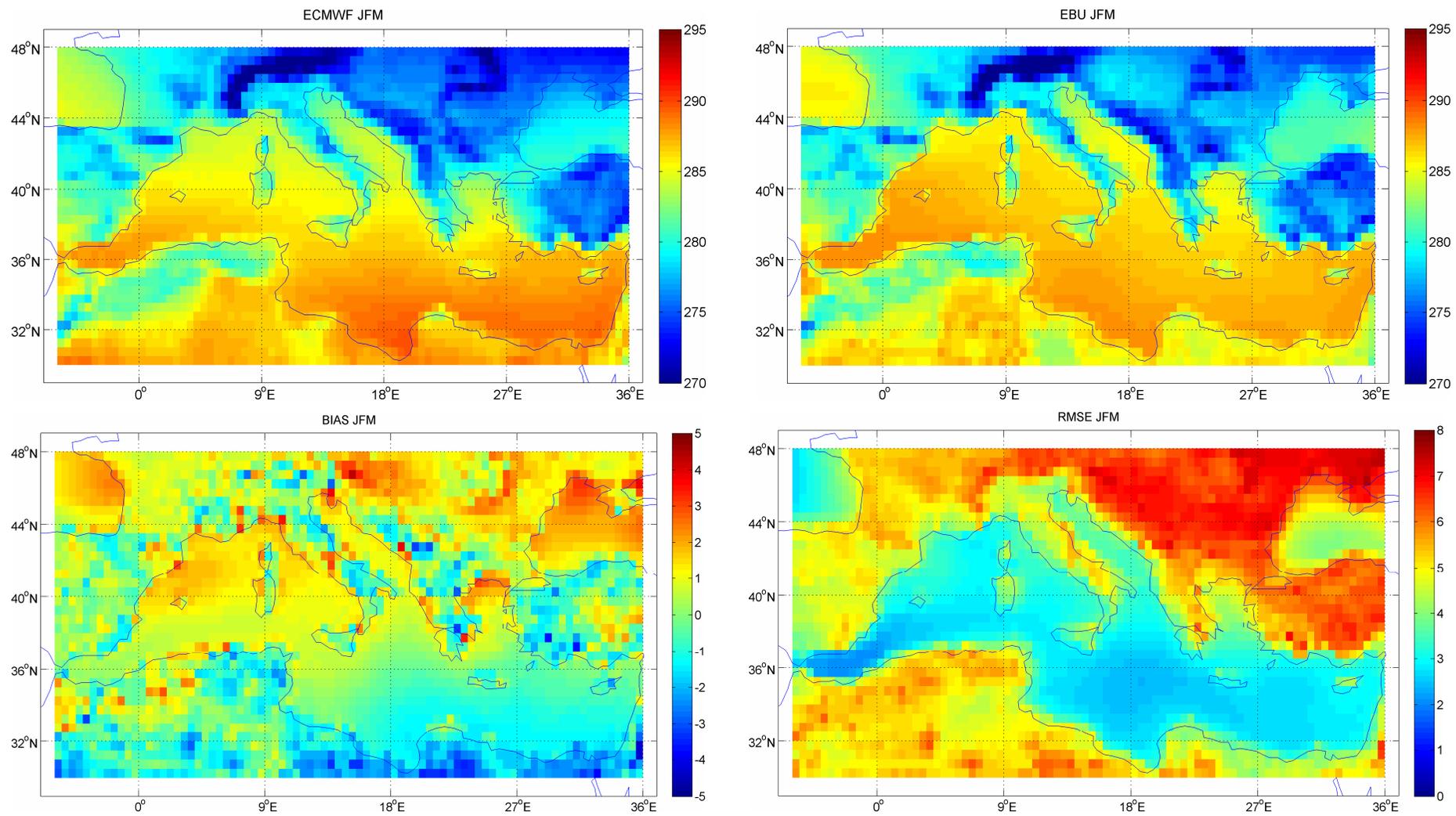


Fig. 13: Mappe dei valori stagionali di T2m in K p er ECMWF, EBU e relativi BIAS e RMSE per i mesi di gennaio, febbraio e marzo del periodo 2002-2008.

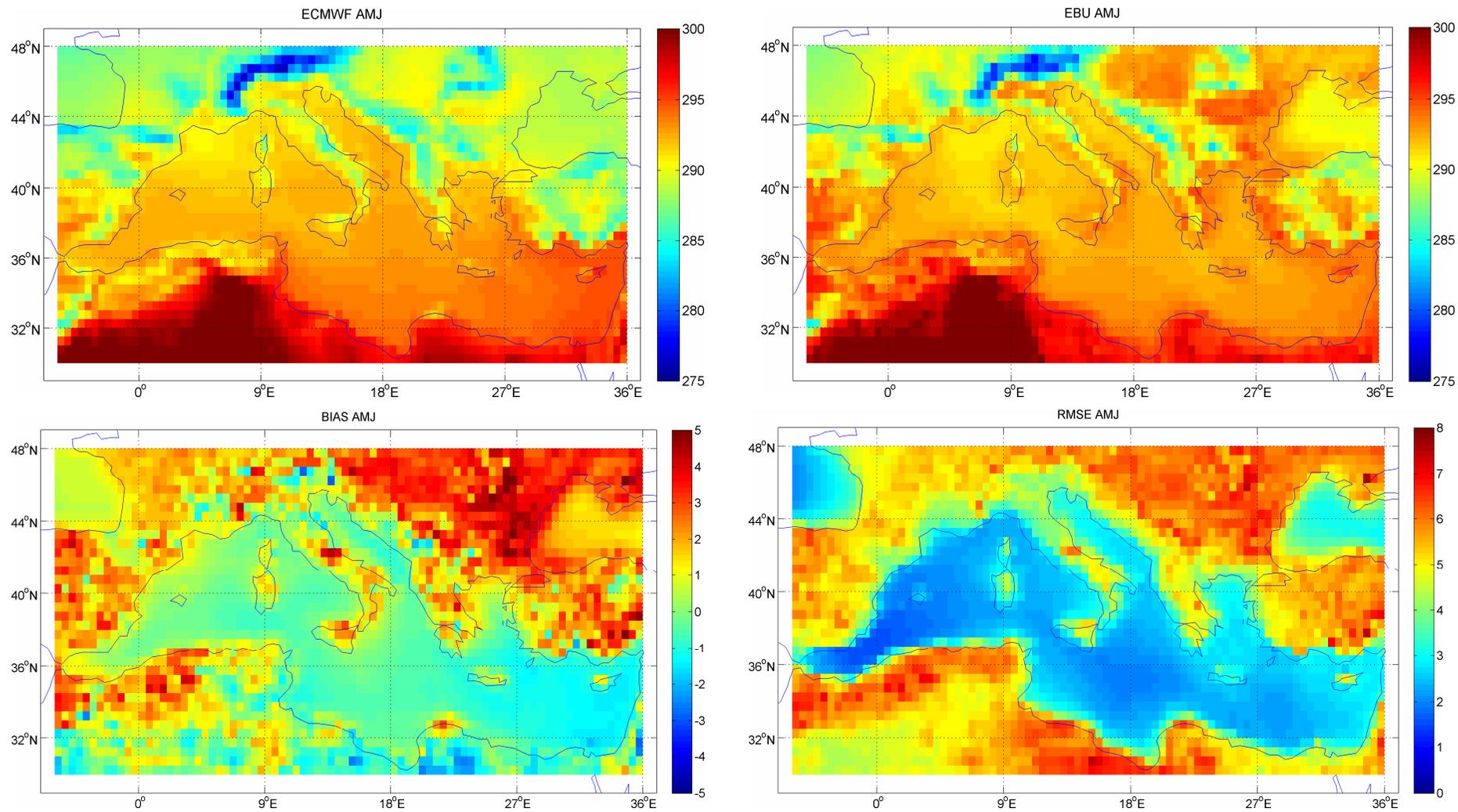


Fig. 14: Mappe dei valori stagionali di T2m in K p per ECMWF, EBU e relativi BIAS e RMSE per i mesi di aprile, maggio e giugno del periodo 2002-2008.

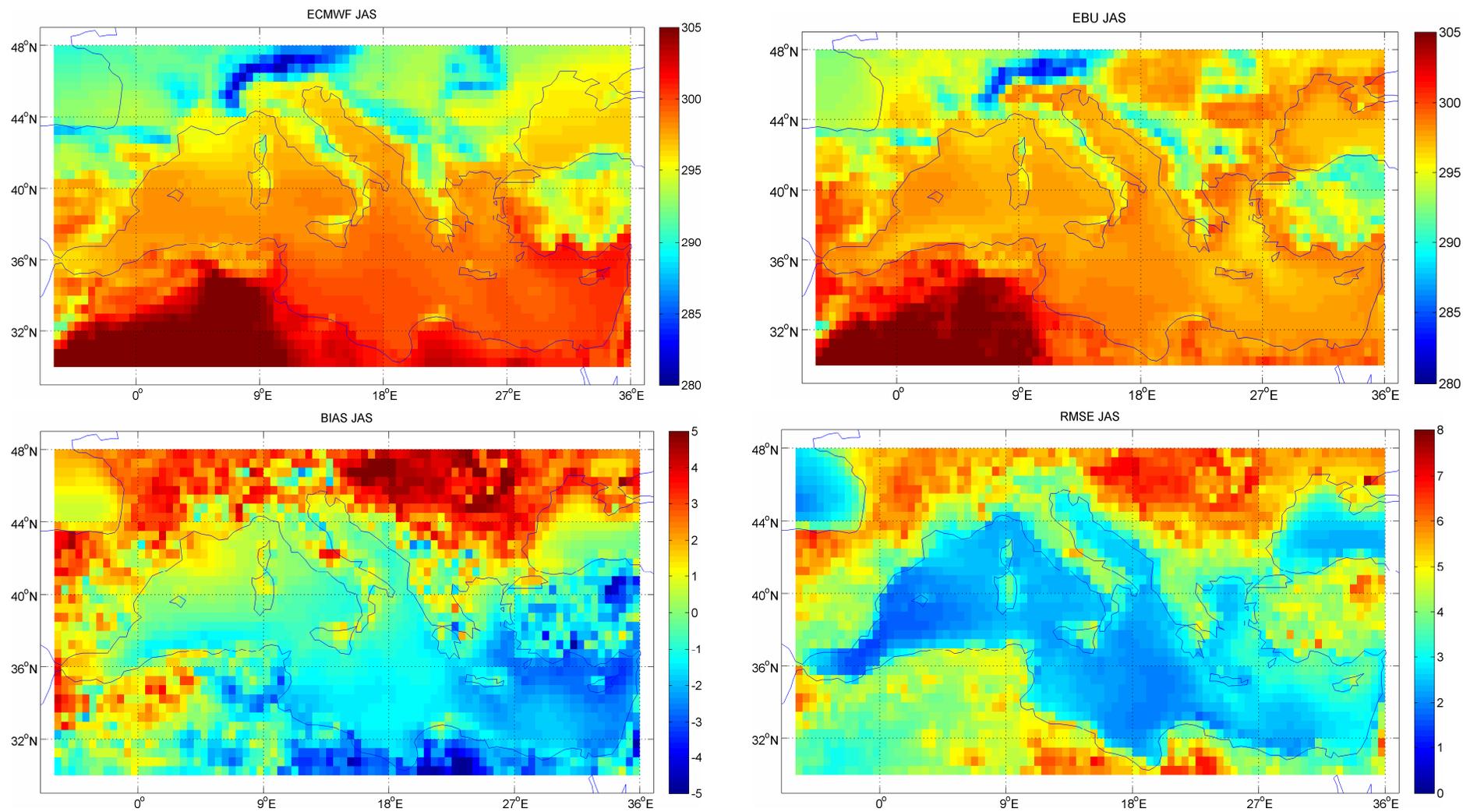


Fig. 15: Mappe dei valori stagionali di T2m in K p per ECMWF, EBU e relativi BIAS e RMSE per i mesi di luglio, agosto e settembre del periodo 2002-2008.

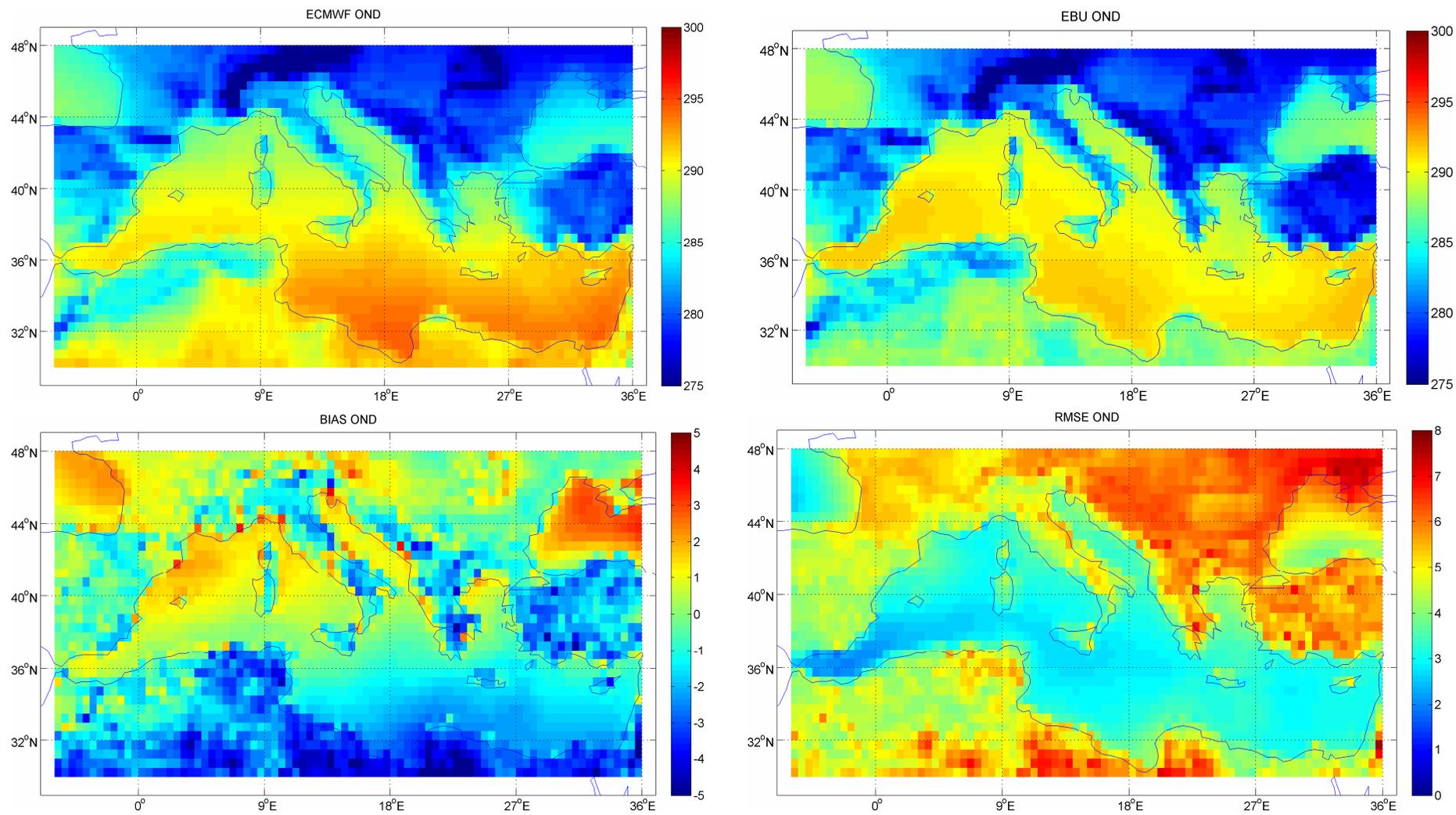


Fig. 16: Mappe dei valori stagionali di T2m in °K per ECMWF, EBU e relativi BIAS e RMSE per i mesi di ottobre, novembre e dicembre del periodo 2002-2008.

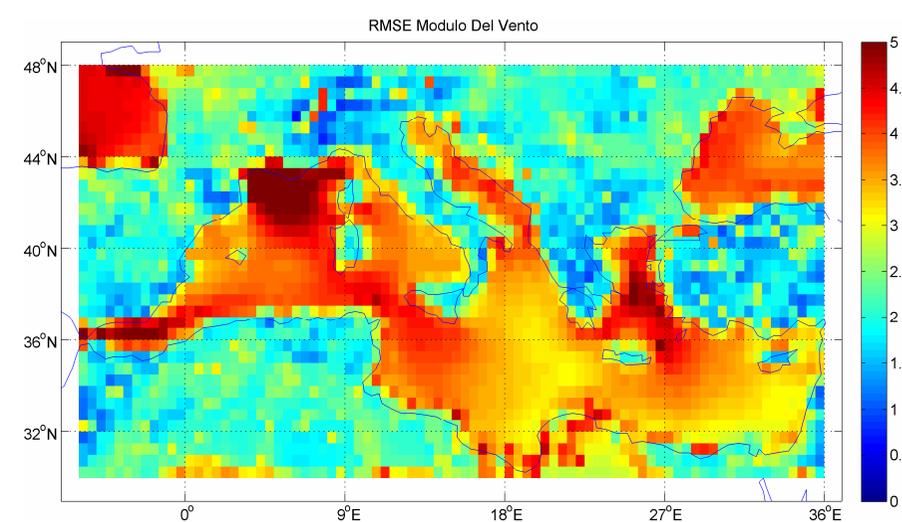
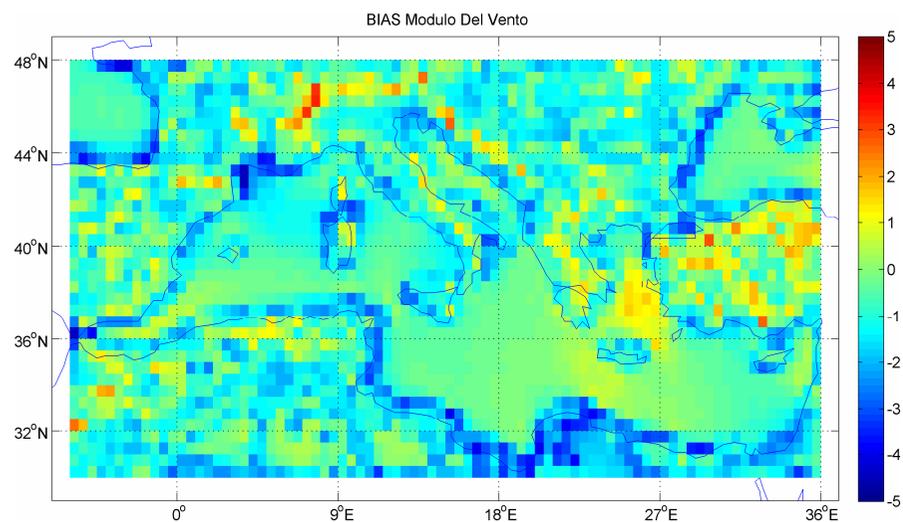
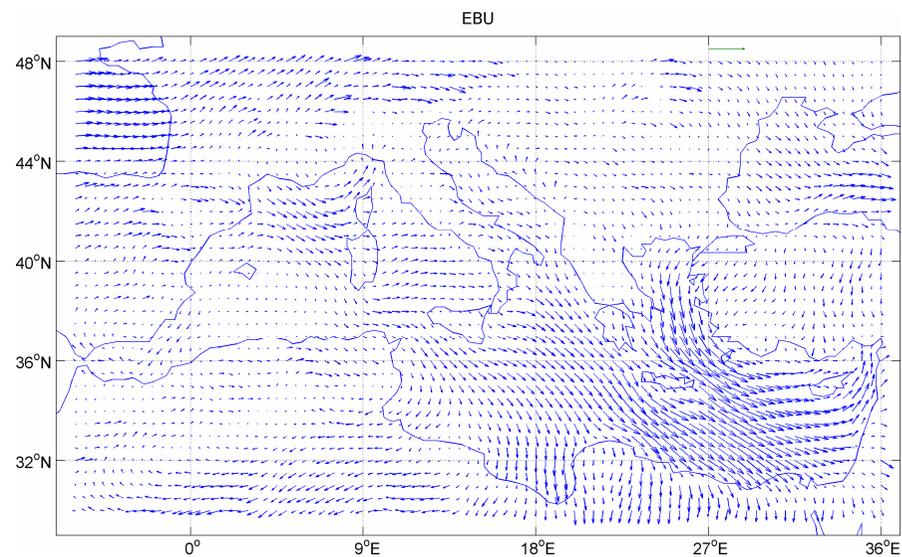
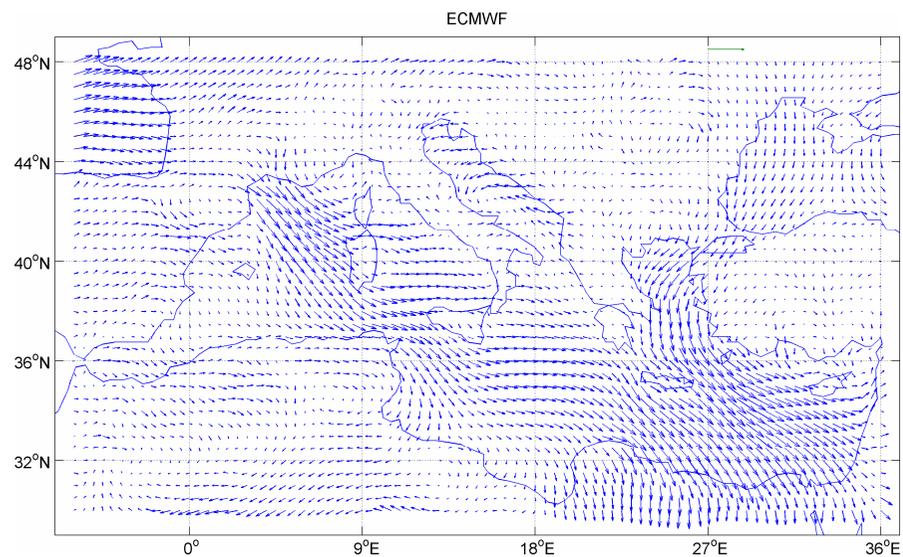


Fig. 17: Mappe del vento per ECMWF e EBU e relativi BIAS e RMSE per l'anno 2002. Il vettore di riferimento (in verde) ha modulo di 5 m/s.

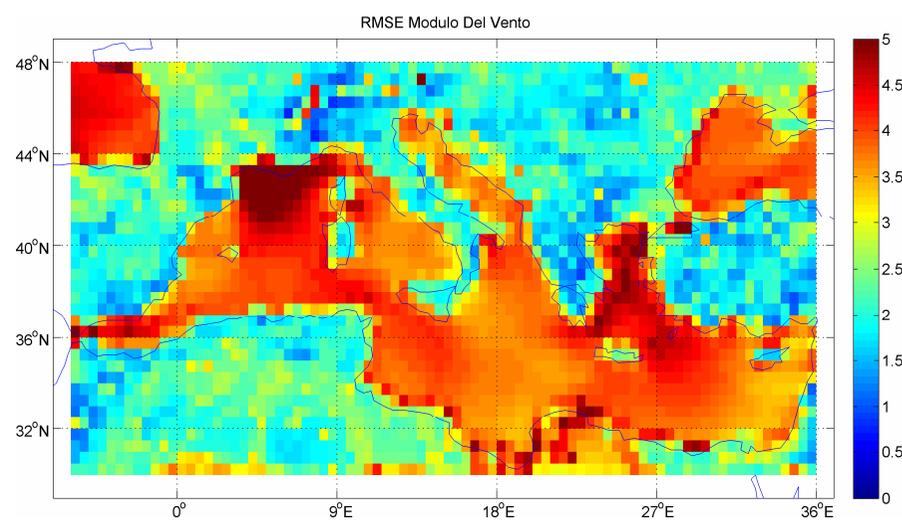
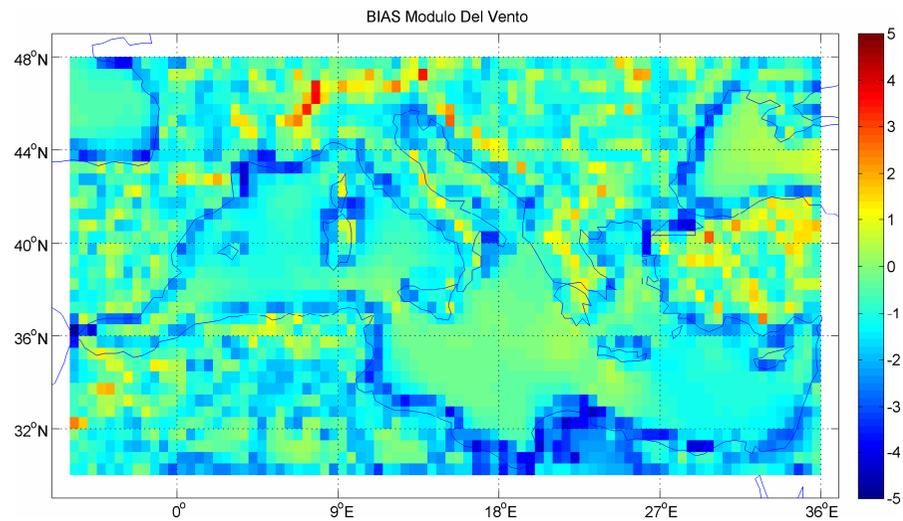
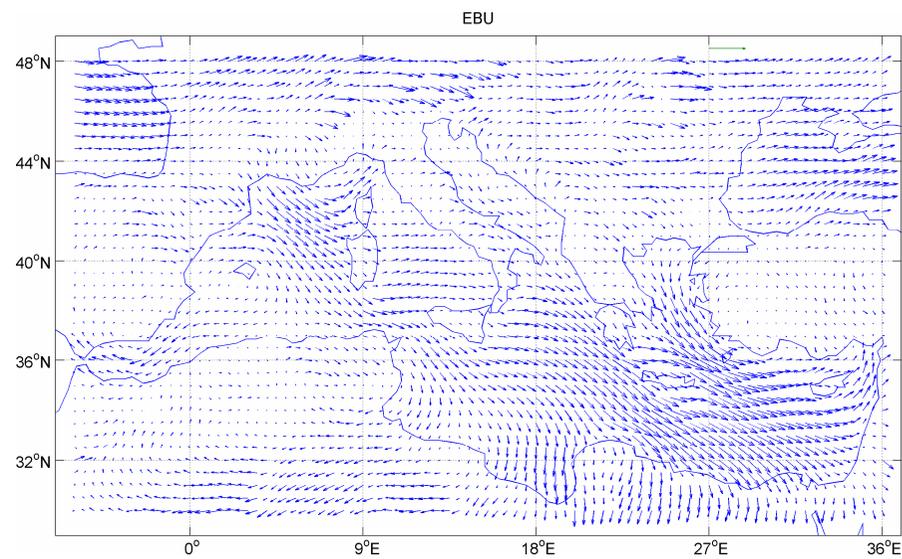
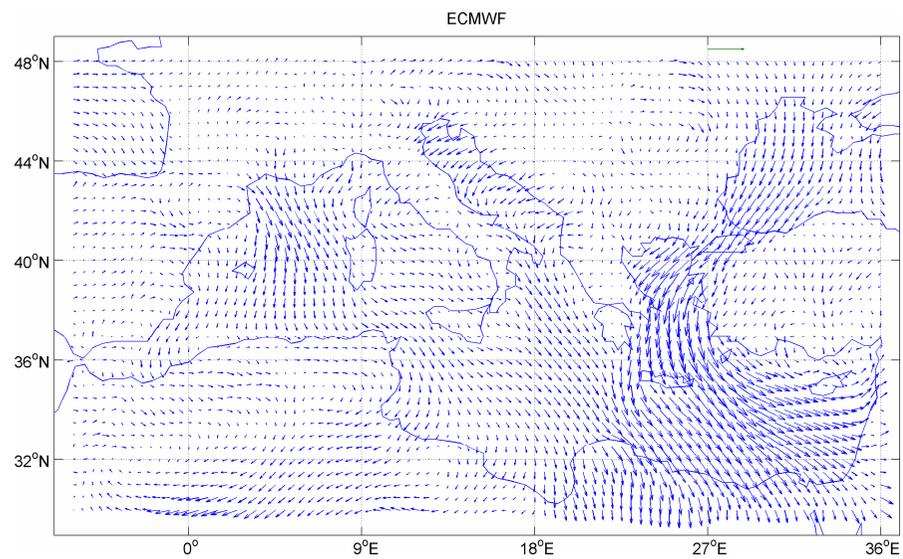


Fig. 18: Mappe del vento per ECMWF e EBU e relativi BIAS e RMSE per l'anno 2003. Il vettore di riferimento (in verde) ha modulo di 5 m/s.

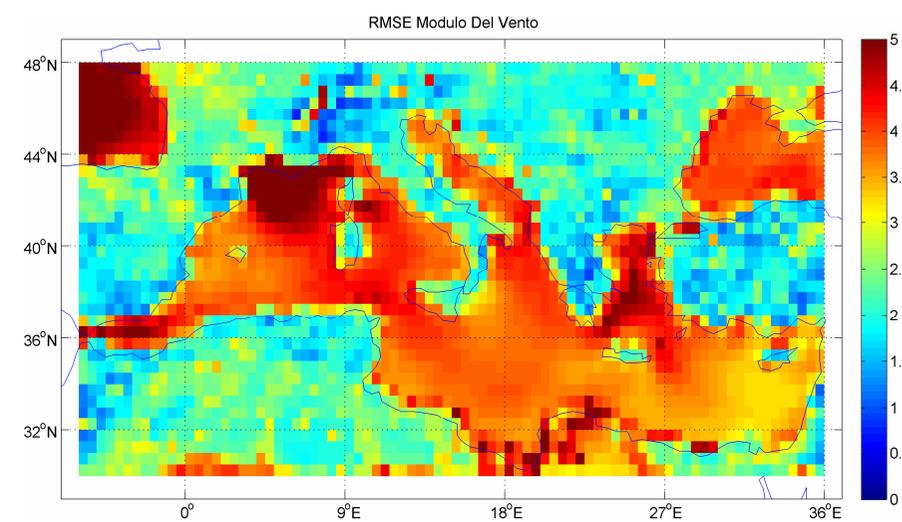
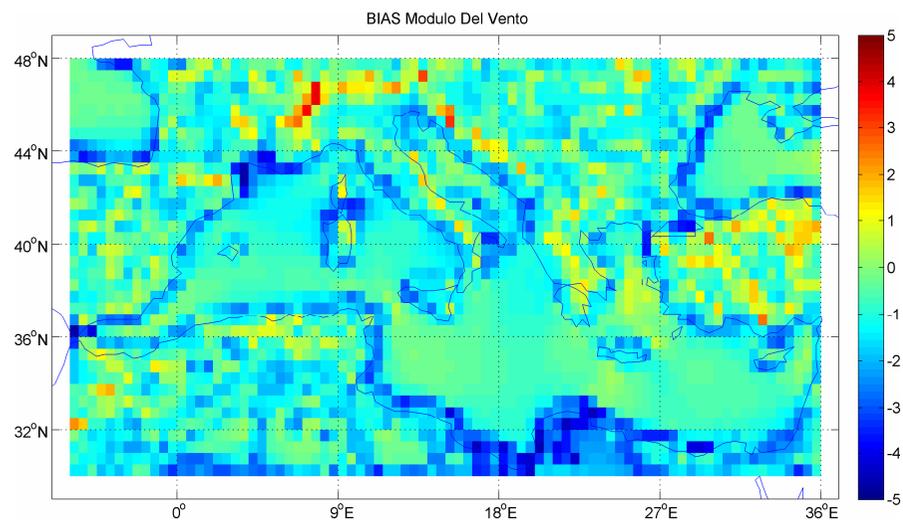
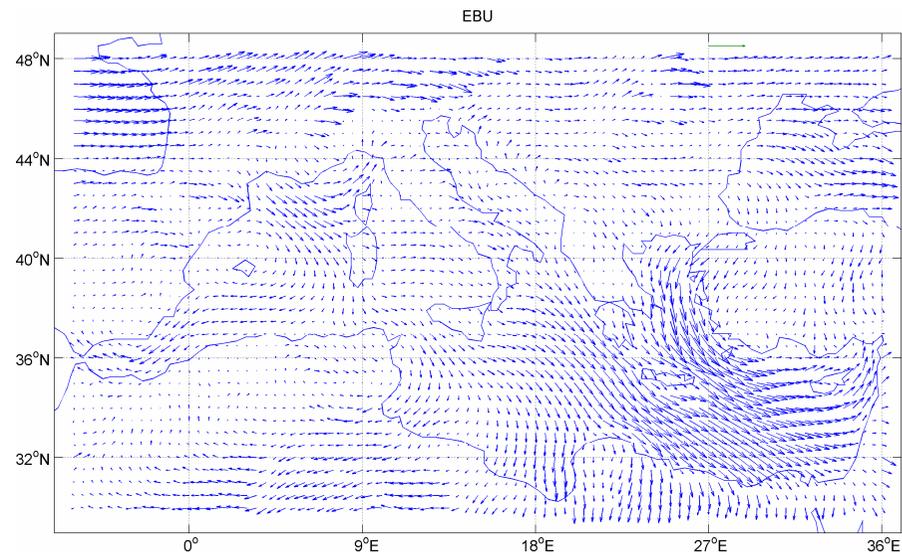
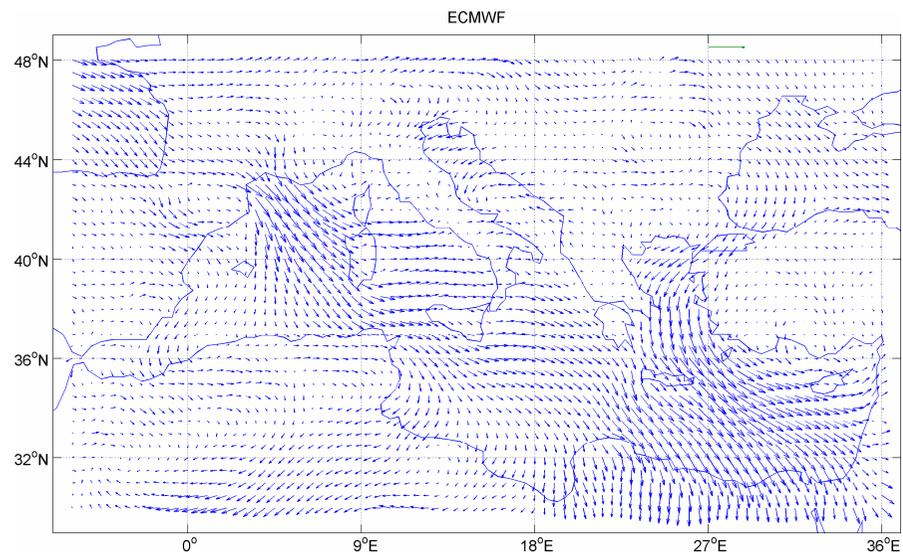


Fig. 19: Mappe del vento per ECMWF e EBU e relativi BIAS e RMSE per l'anno 2004. Il vettore di riferimento (in verde) ha modulo di 5 m/s.

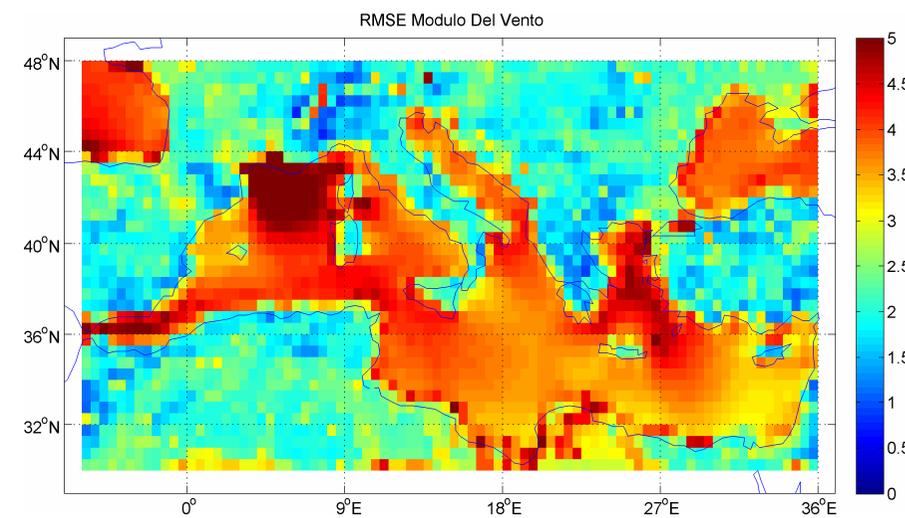
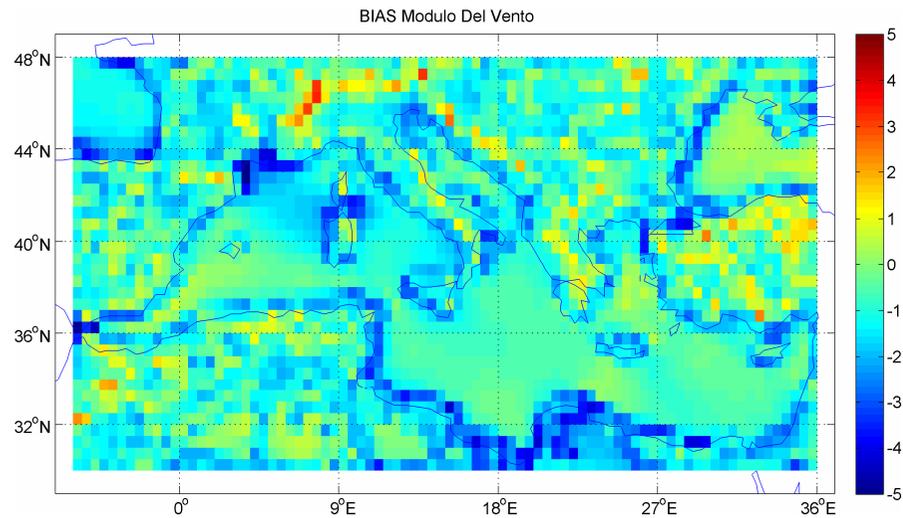
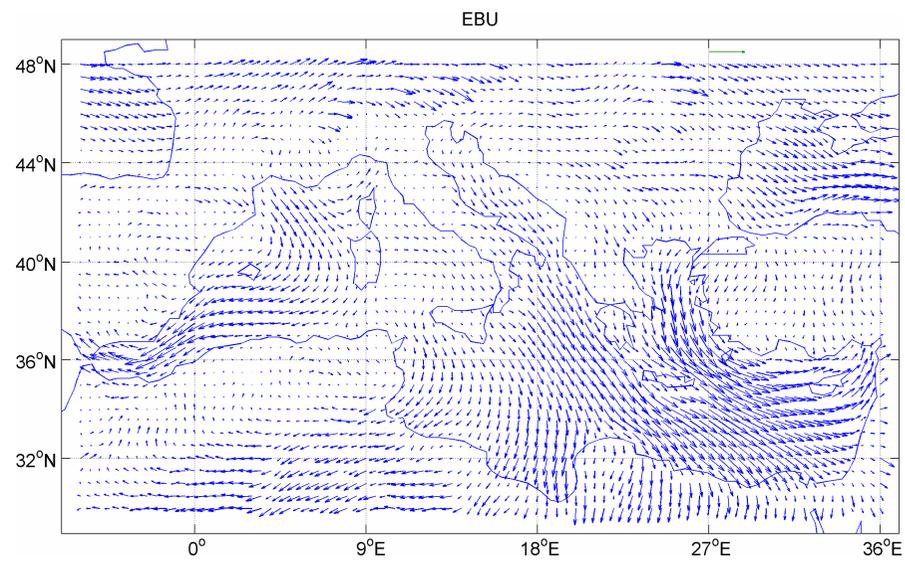
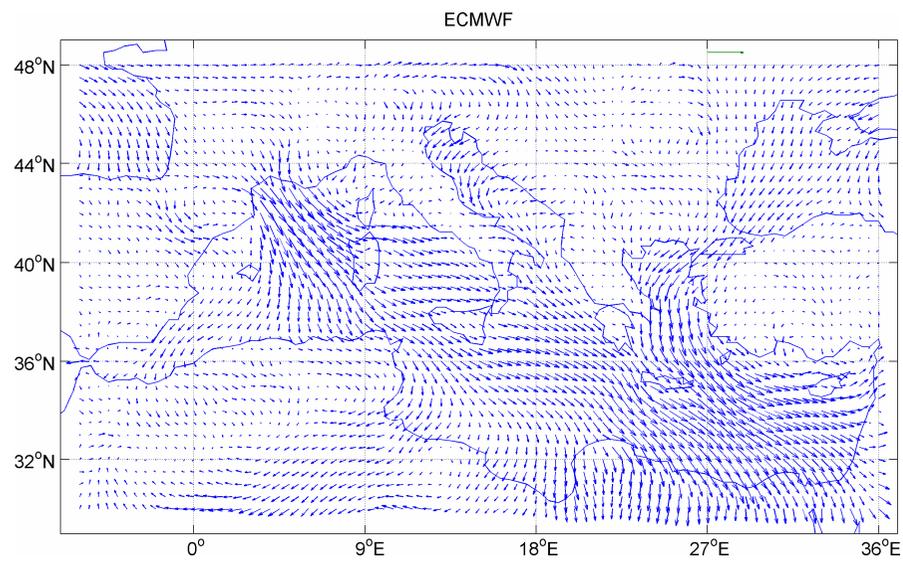


Fig. 20: Mappe del vento per ECMWF e EBU e relativi BIAS e RMSE per l'anno 2005. Il vettore di riferimento (in verde) ha modulo di 5 m/s.

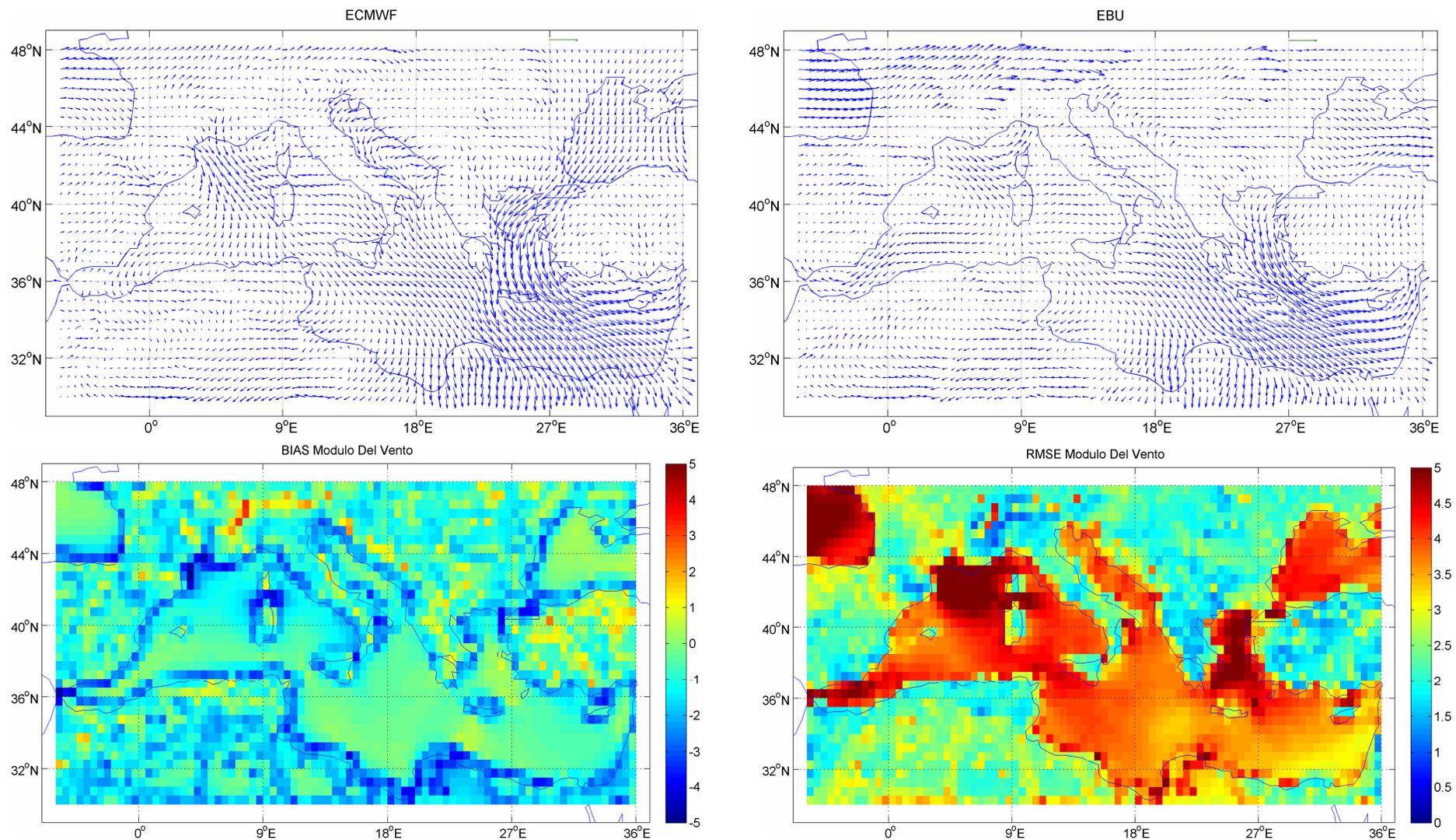


Fig. 21: Mappe del vento per ECMWF e EBU e relativi BIAS e RMSE per l'anno 2006. Il vettore di riferimento (in verde) ha modulo di 5 m/s.

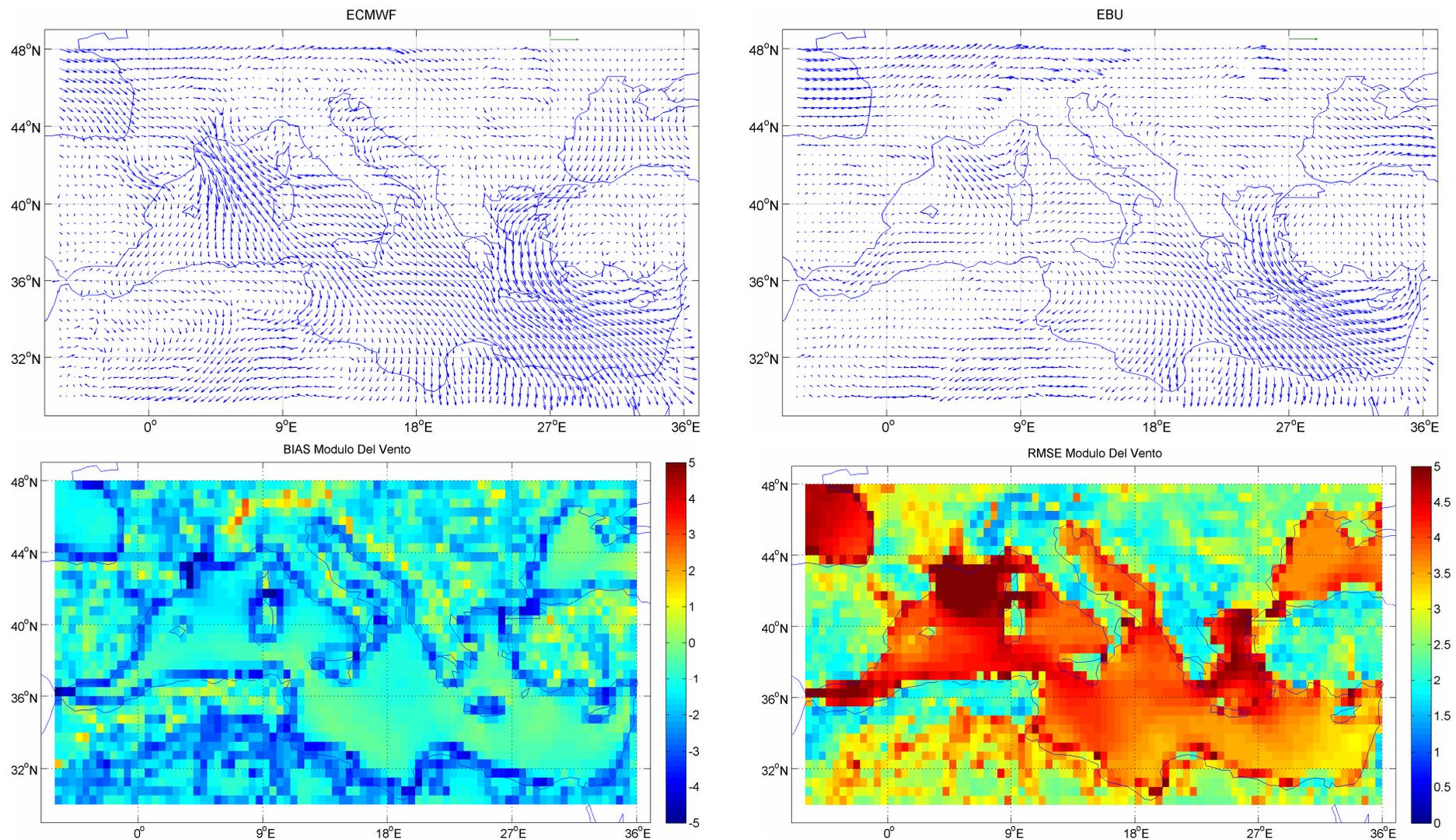


Fig. 22: Mappe del vento per ECMWF e EBU e relativi BIAS e RMSE per l'anno 2007. Il vettore di riferimento (in verde) ha modulo di 5 m/s.

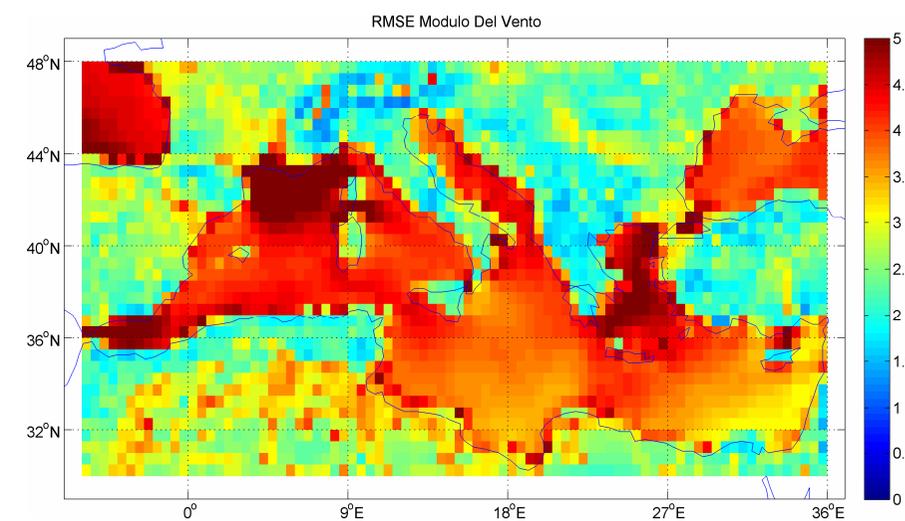
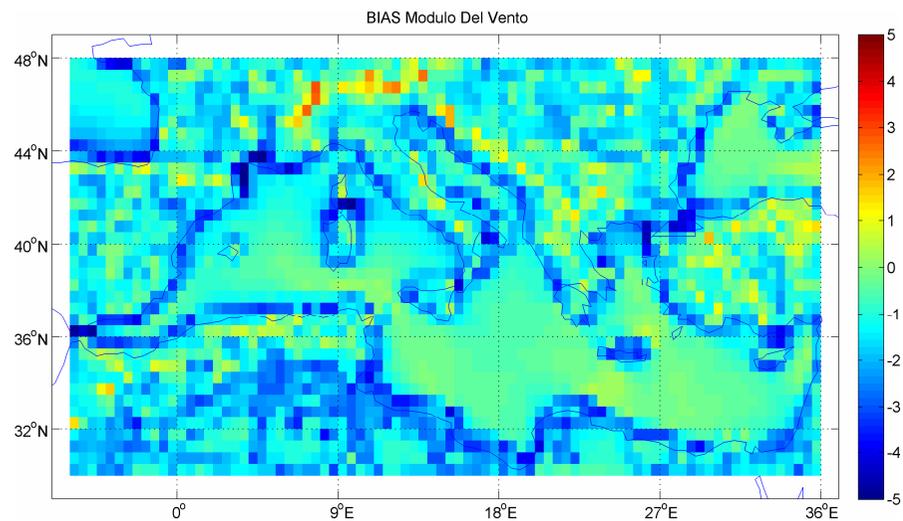
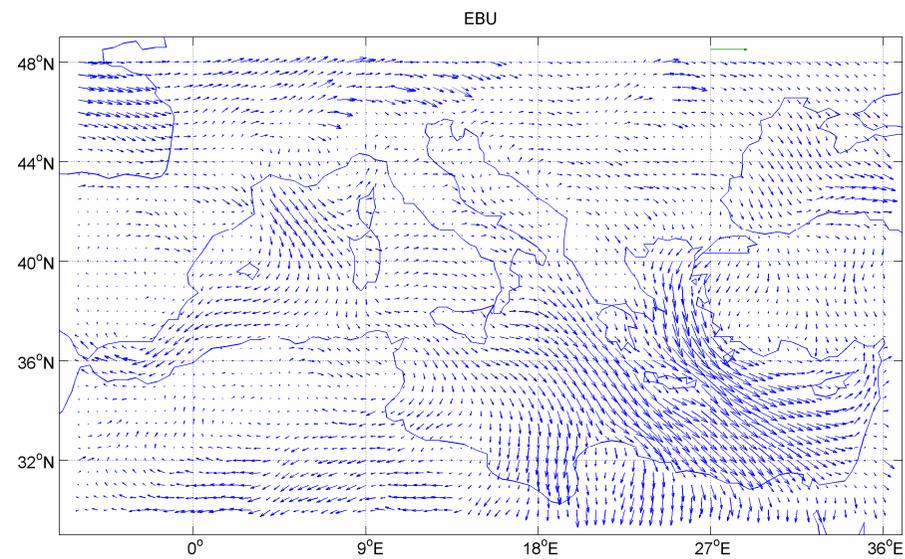
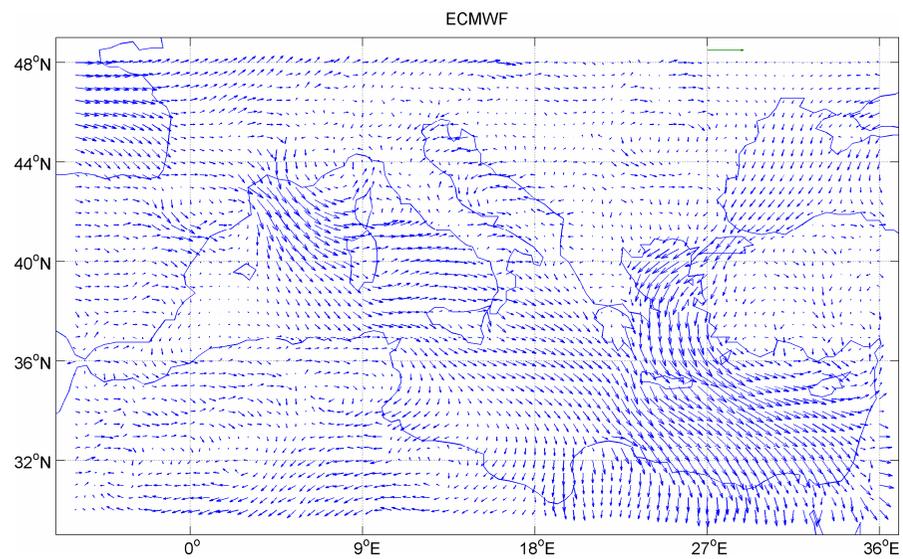


Fig. 23: Mappe del vento per ECMWF e EBU e relativi BIAS e RMSE per l'anno 2008. Il vettore di riferimento (in verde) ha modulo di 5 m/s.

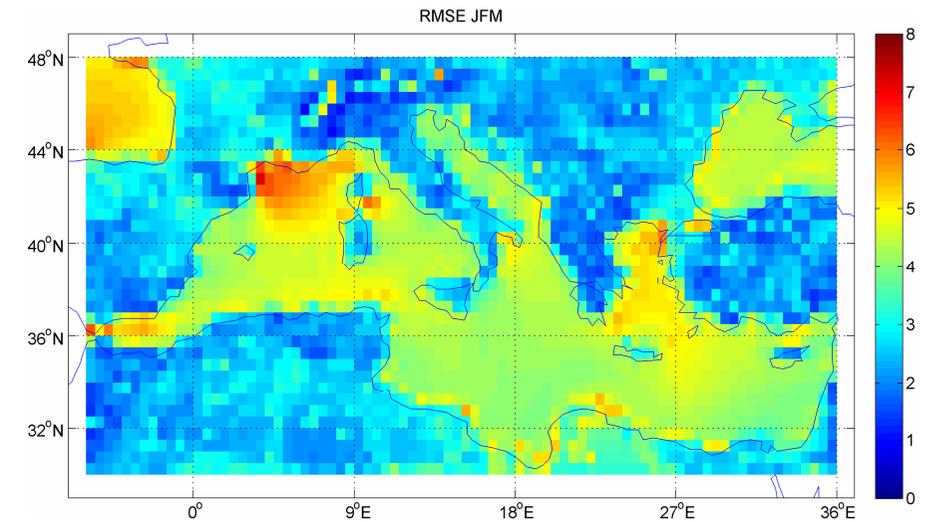
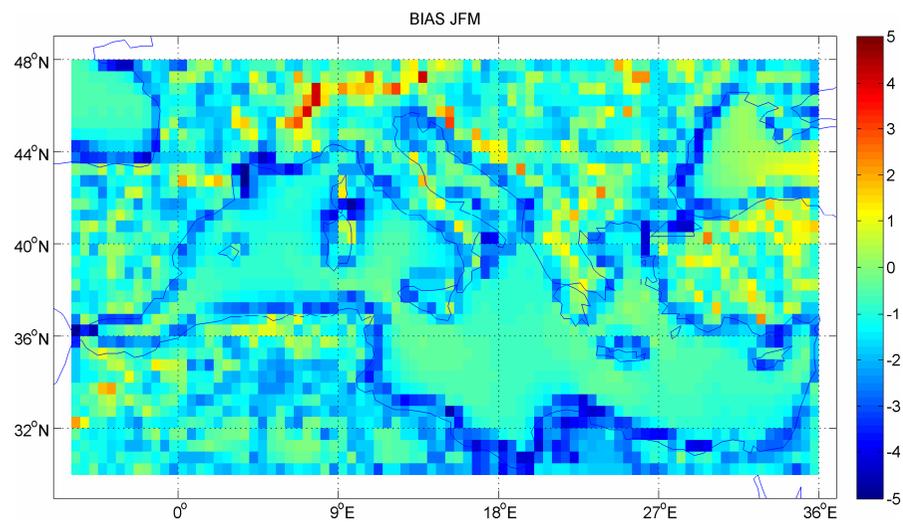
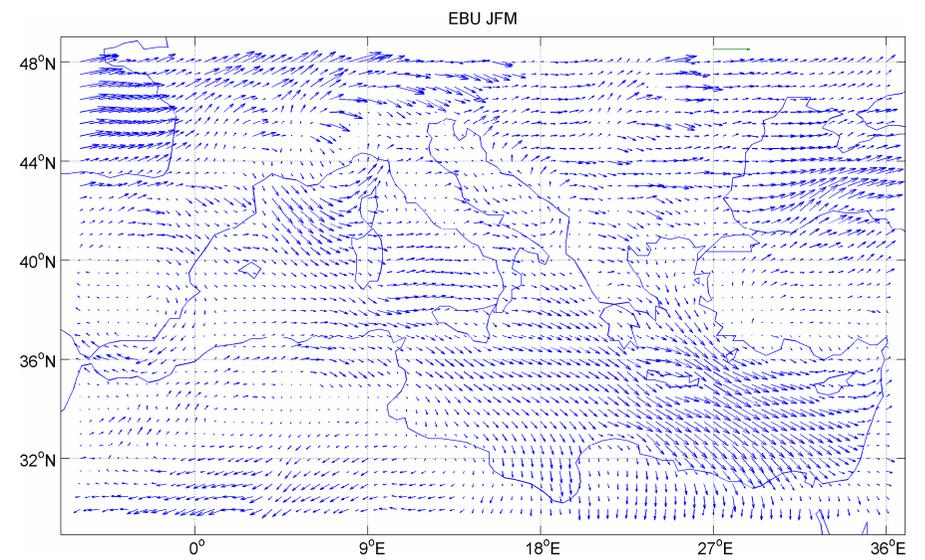
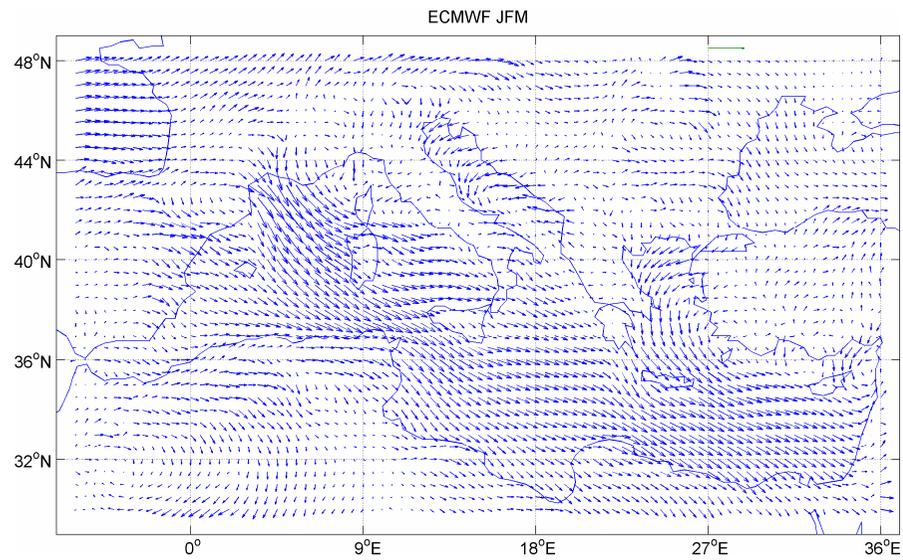


Fig. 24: Mappe del vento per ECMWF e EBU e relativi BIAS e RMSE per i mesi di gennaio, febbraio e marzo . Il vettore di riferimento (in verde) ha modulo di 5 m/s.

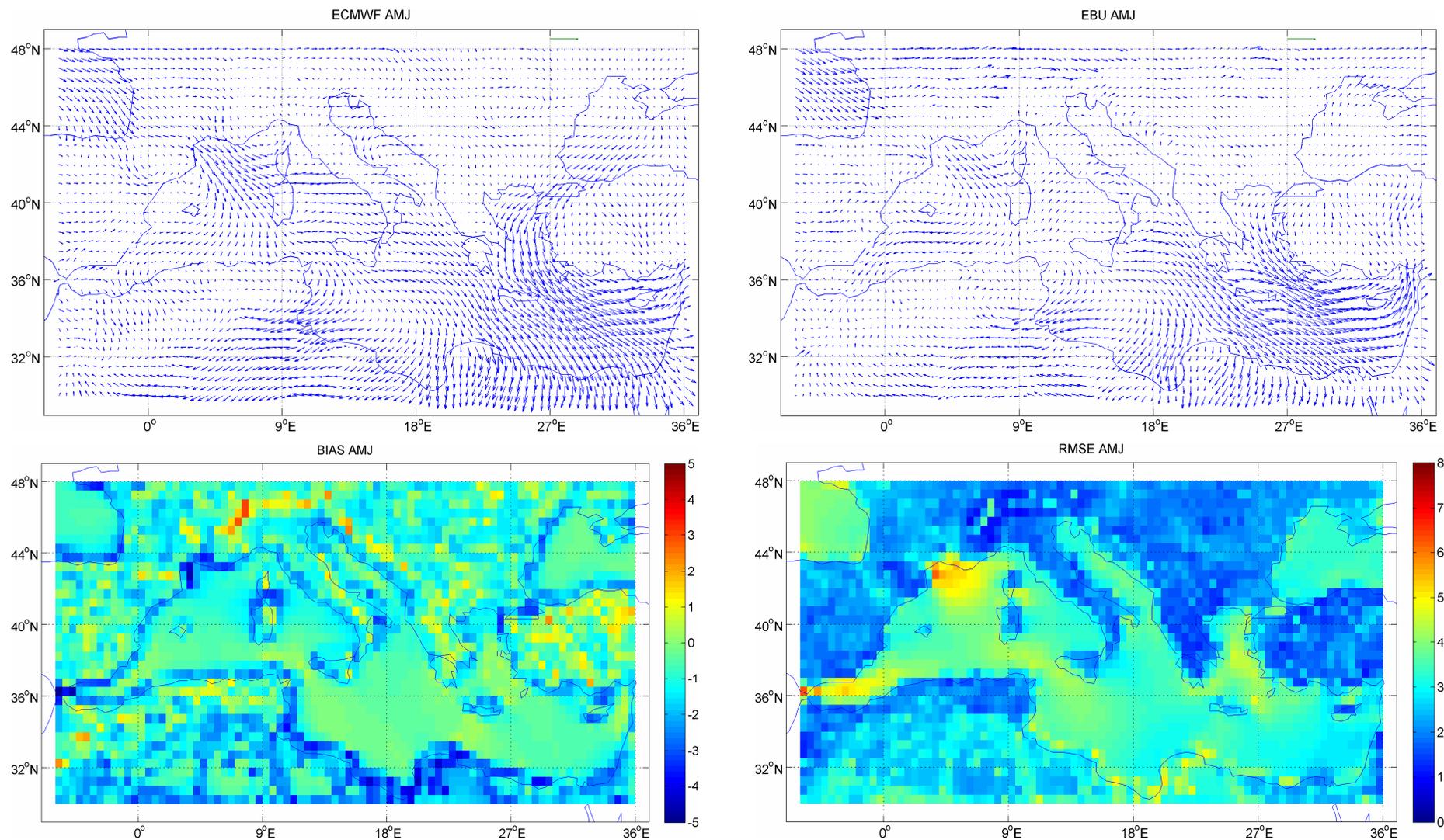


Fig. 25: Mappe del vento per ECMWF e EBU e relativi BIAS e RMSE per i mesi di aprile, maggio, giugno . Il vettore di riferimento (in verde) ha modulo di 5 m/s.

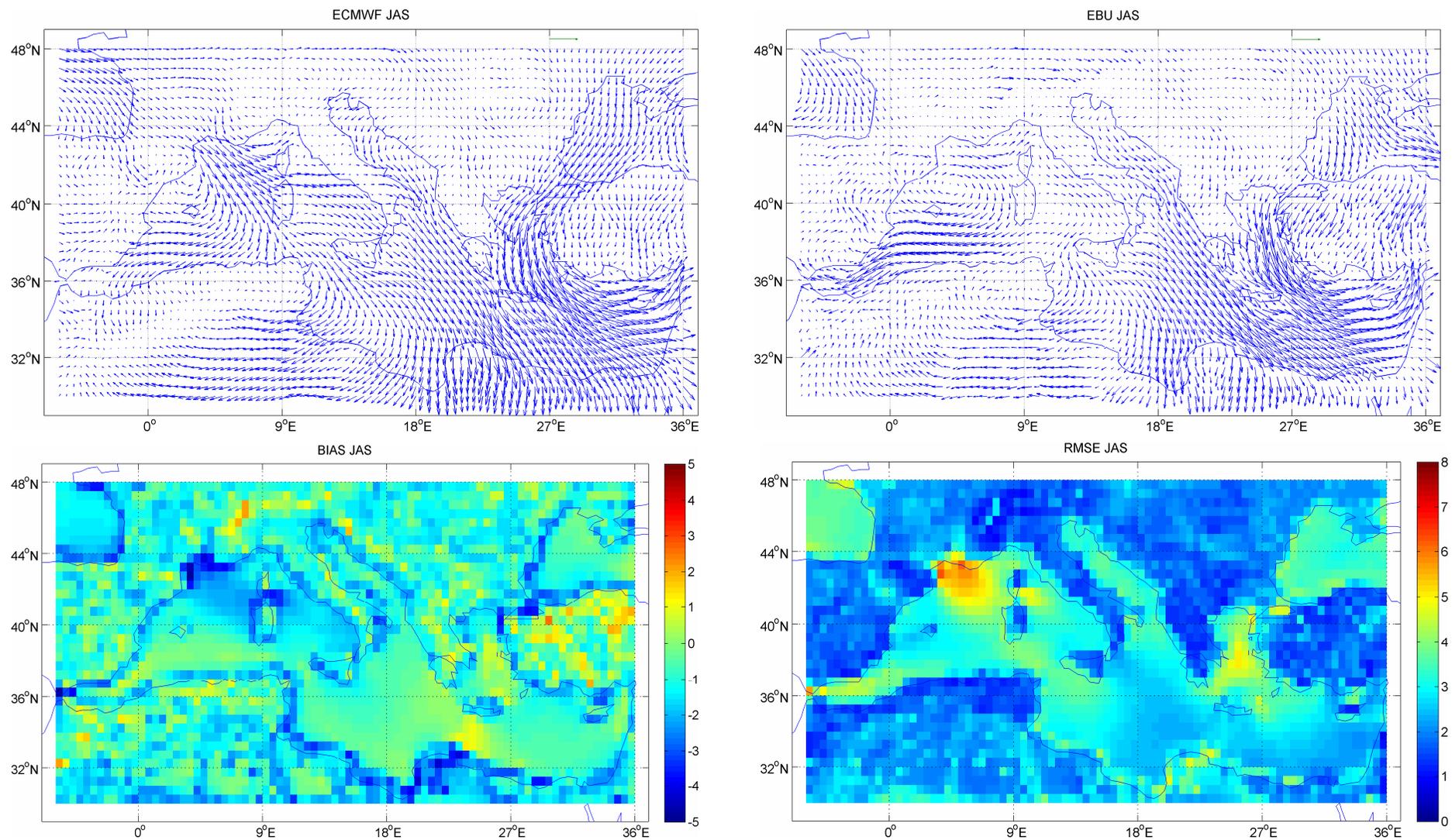


Fig. 26: Mappe del vento per ECMWF e EBU e relativi BIAS e RMSE per i mesi di luglio, agosto, settembre. Il vettore di riferimento (in verde) ha modulo di 5 m/s.

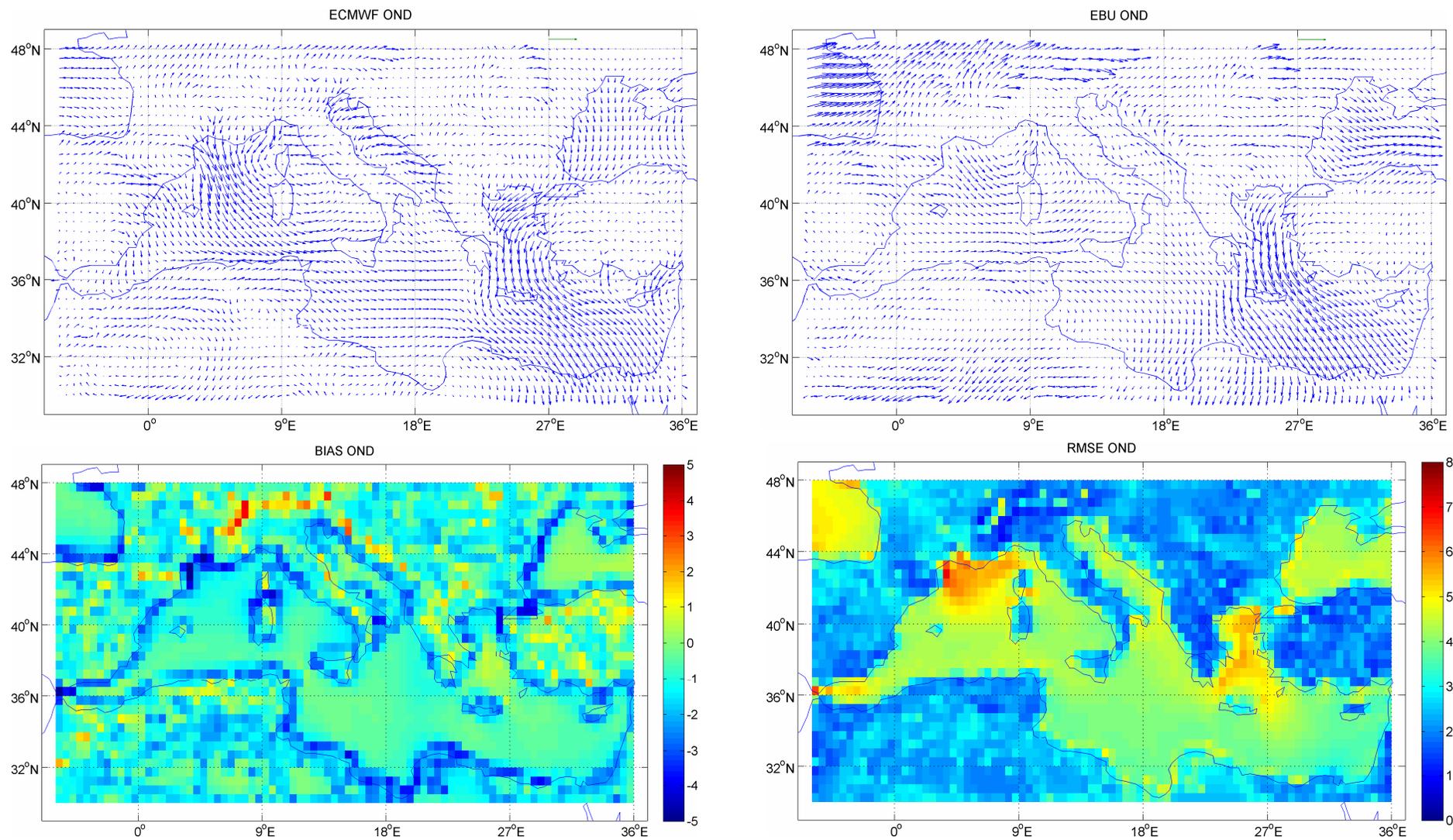


Fig. 24: Mappe del vento per ECMWF e EBU e relativi BIAS e RMSE per i mesi di ottobre, novembre, dicembre. Il vettore di riferimento (in verde) ha modulo di 5 m/s.

5. Studio degli scenari futuri

Gli scenari futuri sono valutati confrontando i valori dei campi EBU-POM del periodo 2002-2008 con quelli degli ultimi sette anni della simulazione (2024-2030). Nel calcolo dei valori medi per l'intero bacino sono stati considerati solo i punti di mare. Nelle figure seguenti (Fig. 25, 26, 27) sono illustrati i valori medi annuali di temperatura dell'aria a due metri, pressione al livello del mare e modulo del vento a dieci metri per la simulazione di scenario (anni 2002-2030) e per l'analisi ECMWF (anni 2002-2008). Le linee di tendenza (in nero) sono calcolate per i campi EBU-POM.

Tab.4: Valori medi dei campi per i due periodi, medie stagionali e differenze.

	T2m (°K)			SLP (hPa)			Mod Vento (m/s)		
	2002-2008	2024-2030	Diff.	2002-2008	2024-2030	Diff.	2002-2008	2024-2030	Diff.
JFM	285,452	285,940	0,489	1023,336	1023,423	0,086	5,005	5,034	0,029
AMJ	291,718	292,099	0,381	1014,248	1015,496	1,248	3,906	3,818	-0,088
JAS	296,889	297,789	0,900	1014,264	1013,601	-0,662	3,548	3,460	-0,088
OND	289,218	289,876	0,658	1021,482	1021,564	0,082	4,769	4,656	-0,112
	290,819	291,426	0,607	1018,333	1018,521	0,189	4,307	4,242	-0,065

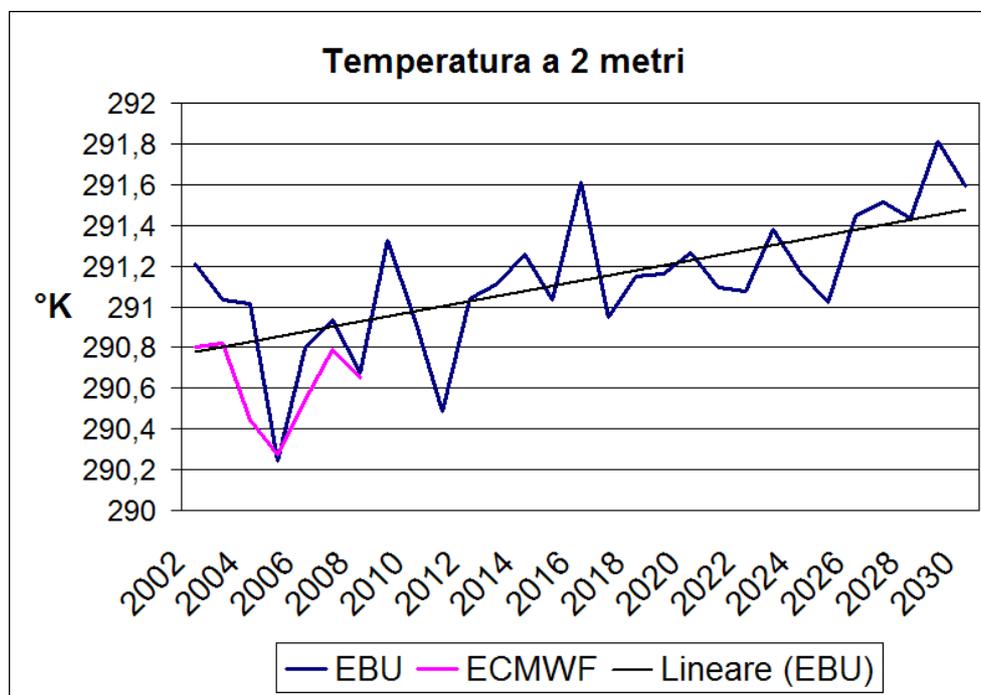


Fig. 25: Valori medi annuali della temperatura dell'aria a due metri (°K).

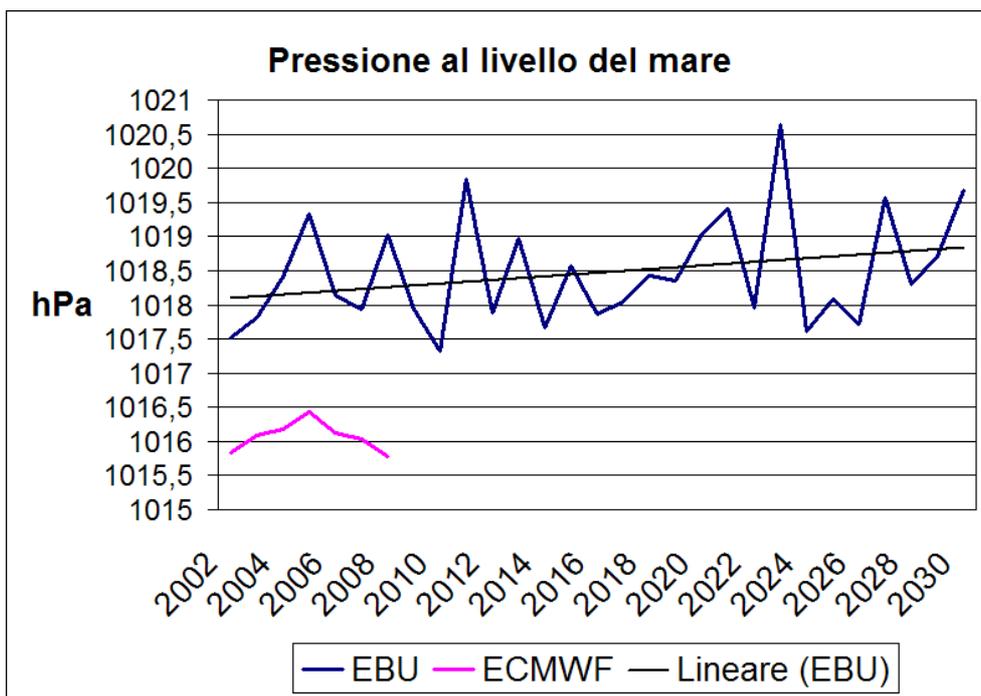


Fig. 26: Valori medi annuali della pressione al livello del mare (hPa).

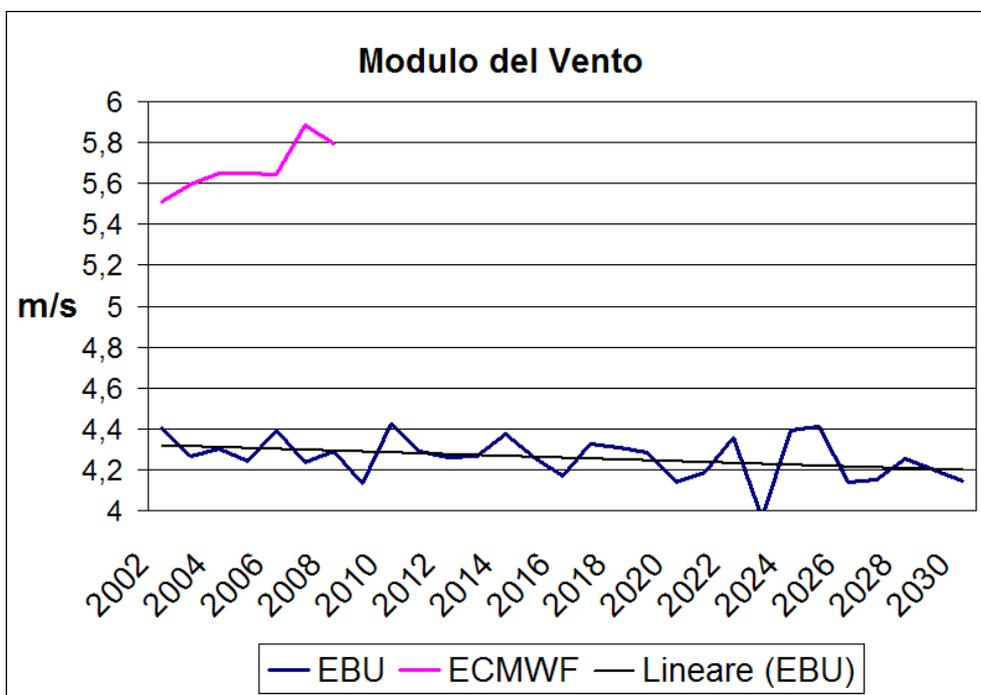


Fig. 27: Valori medi annuali del modulo del vento a 10 metri (m/s).

Nei grafici successivi (Fig. 28, 29, 30) vengono messi a confronto i valori medi stagionali dei due periodi di interesse.

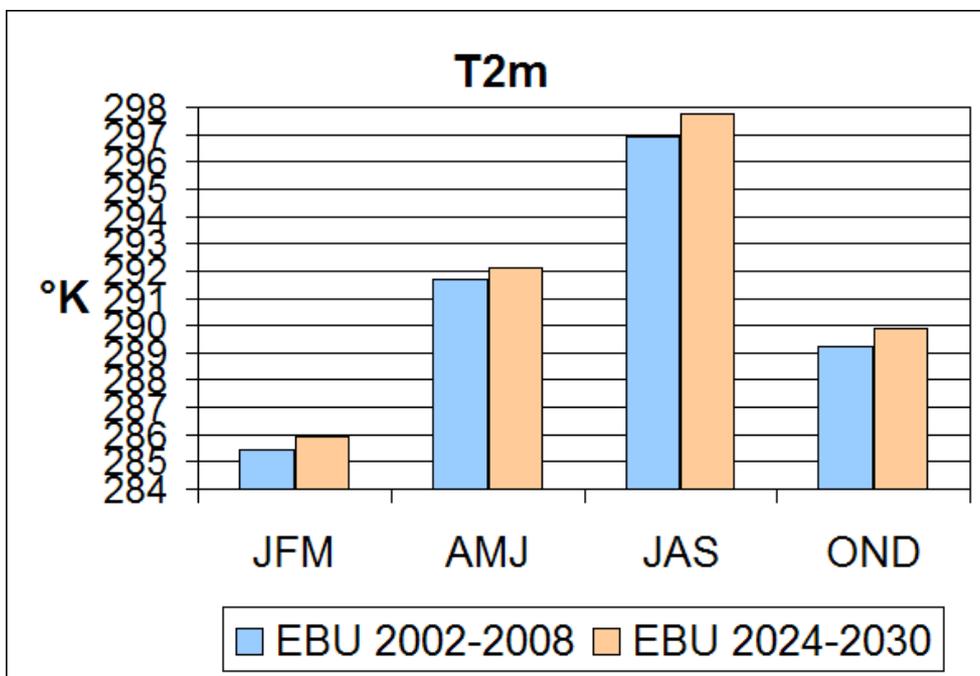


Fig. 28: Valori medi stagionali della temperatura a due metri per i periodi a confronto.

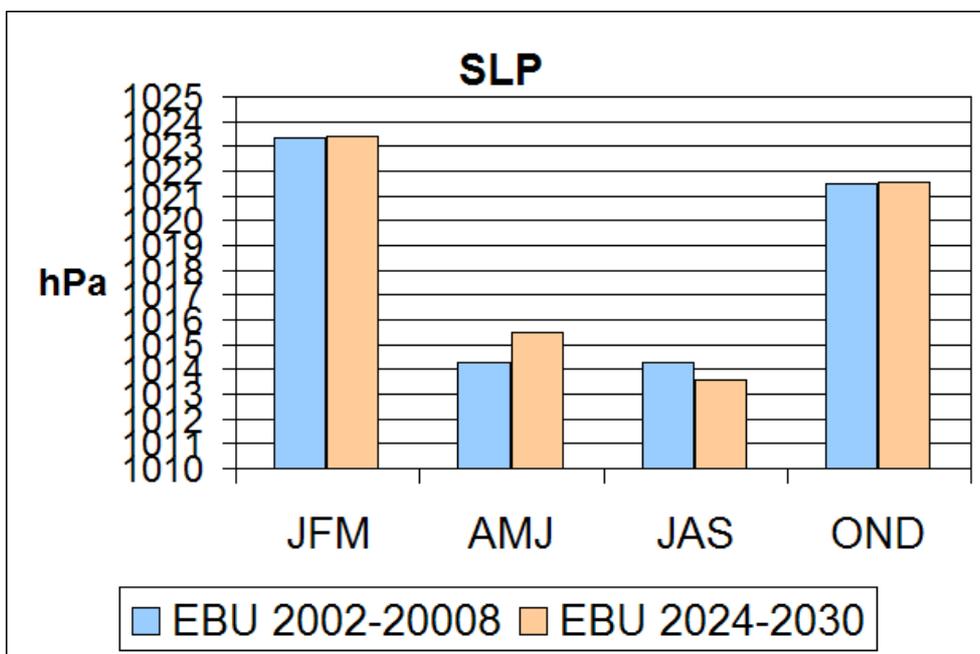


Fig. 29: Valori medi stagionali della pressione al livello del mare per i periodi a confronto.

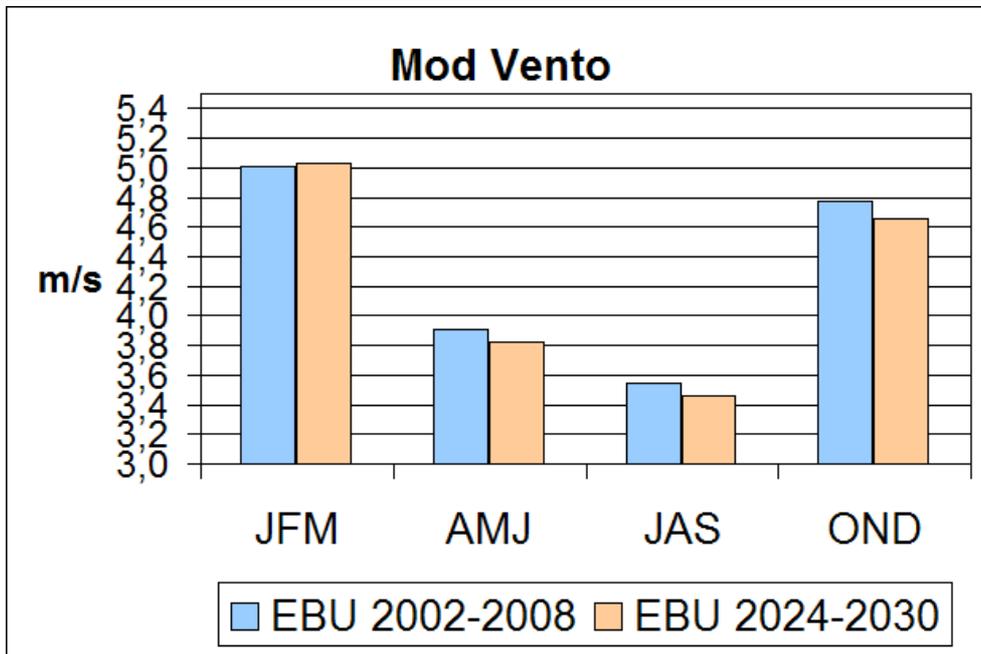


Fig. 29: Valori medi stagionali del modulo del vento per i periodi a confronto.

5.1 Studio degli scenari: Mappe

Lo studio dello scenario è stato condotto anche per ogni punto griglia e i risultati ottenuti sono illustrati nelle figure seguenti. L'analisi è stata svolta per i campi di temperatura a dieci metri e del vento.

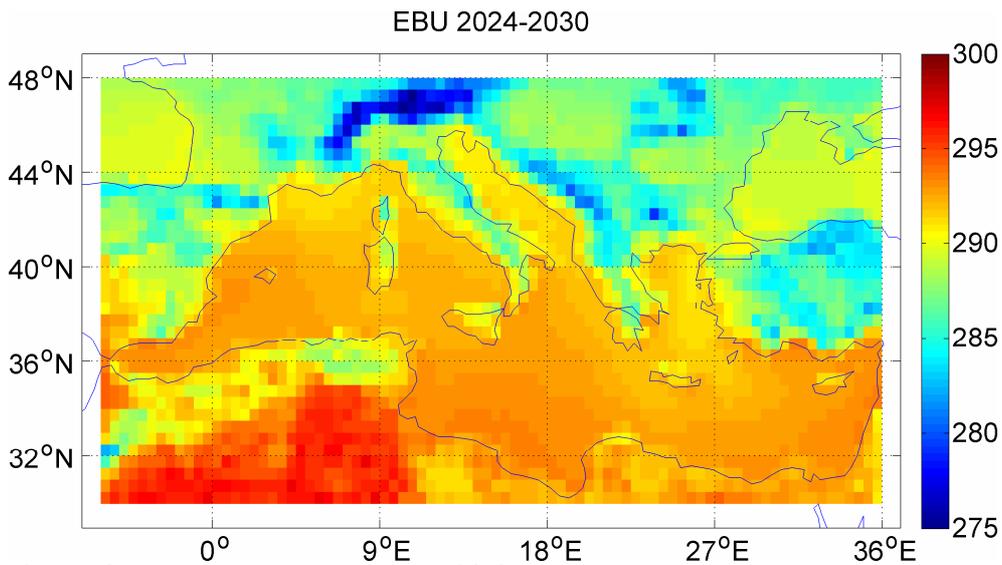


Fig. 30: Campo di temperatura a 2 metri (K), anni 2024-2030.

EBU 2024-2030 - EBU 2002-2008

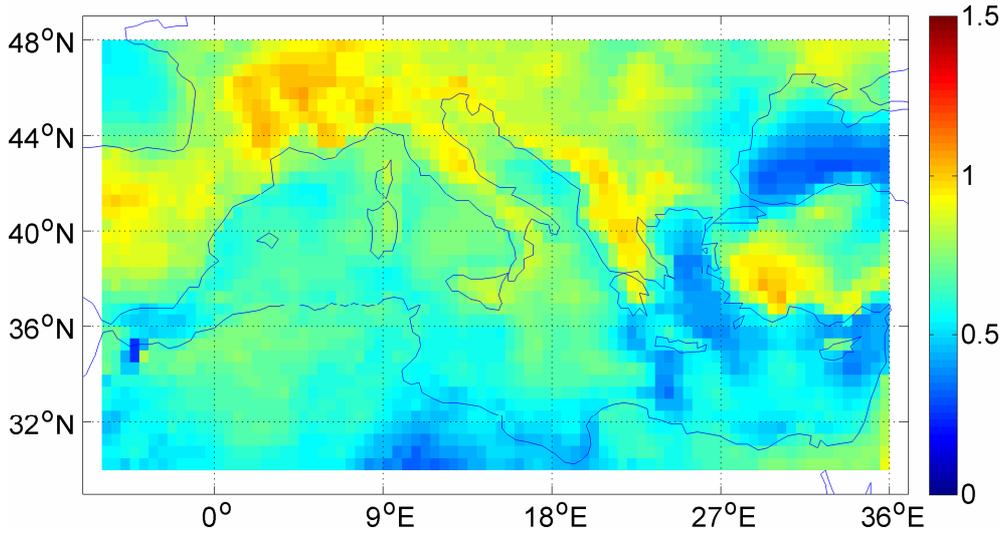


Fig. 31: Differenza del campo di temperatura a 2 metri.

EBU 2024-2030

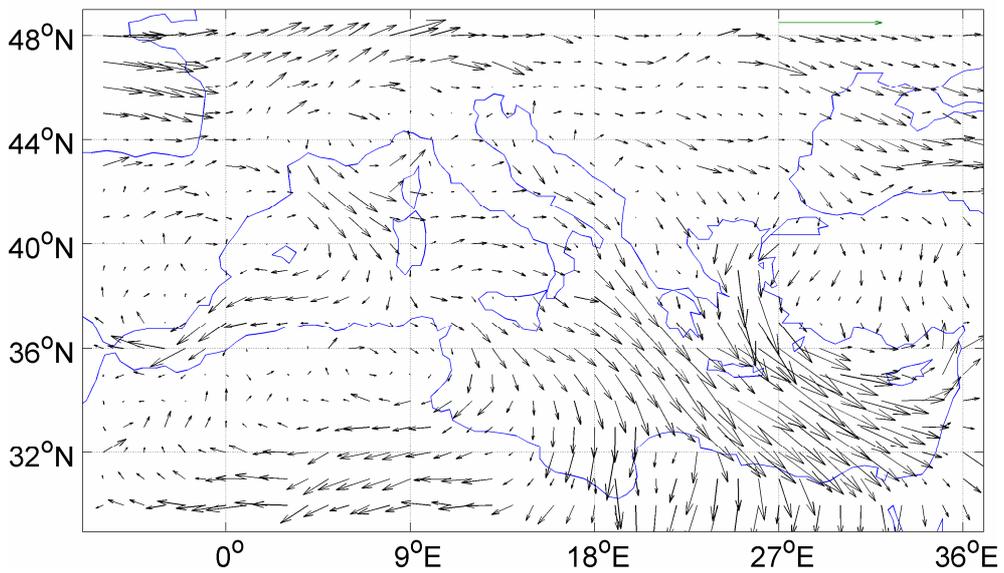
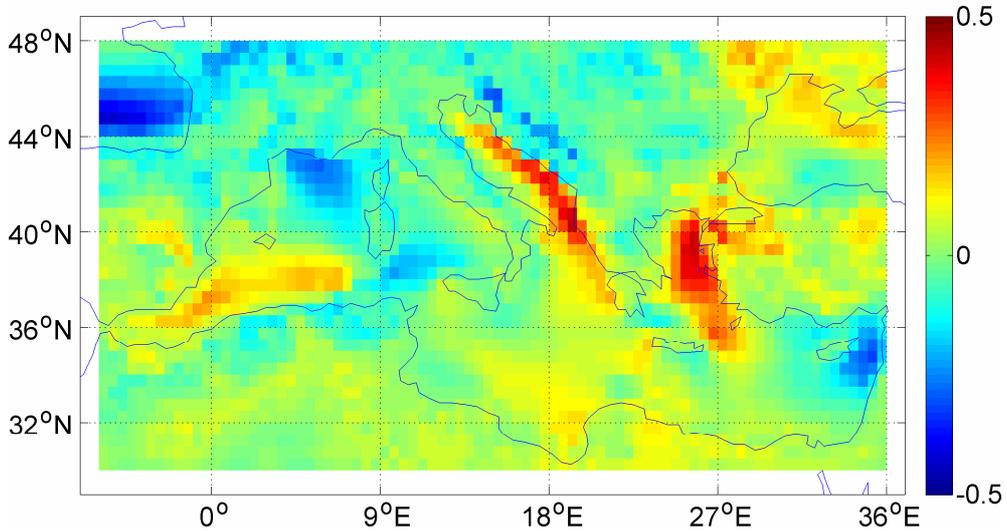


Fig. 32: Campo del vento a 10 metri (m/s), anni 2024-2030.

Fig. 33: Differenza del modulo del vento a 10 metri.

EBU 2024-2030 - EBU 2002-2008



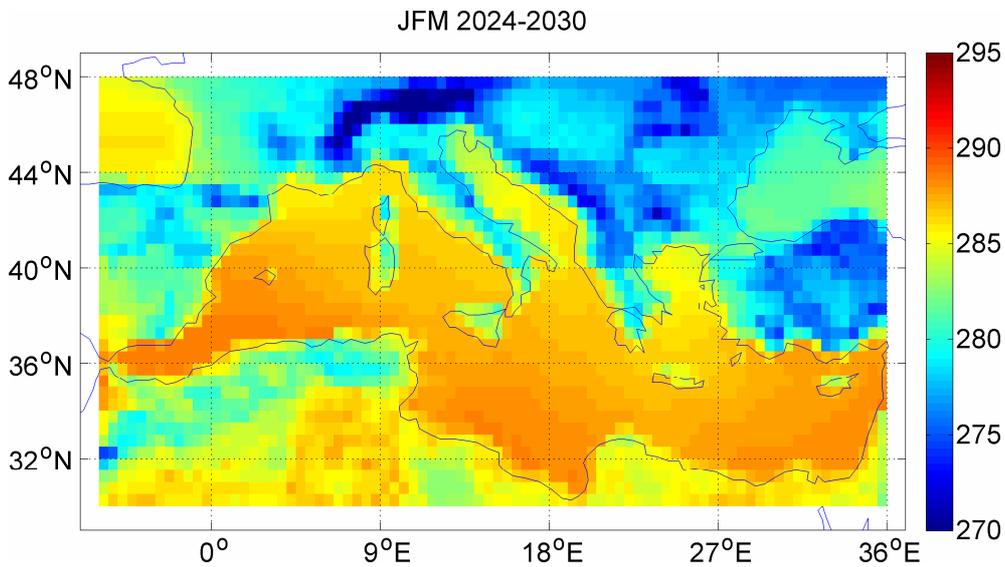


Fig. 34: Campo di temperatura a 2 metri, media stagionale invernale, anni 2024-2030.

Fig. 35: Differenza del campo di temperatura a 2 metri, media stagionale invernale.

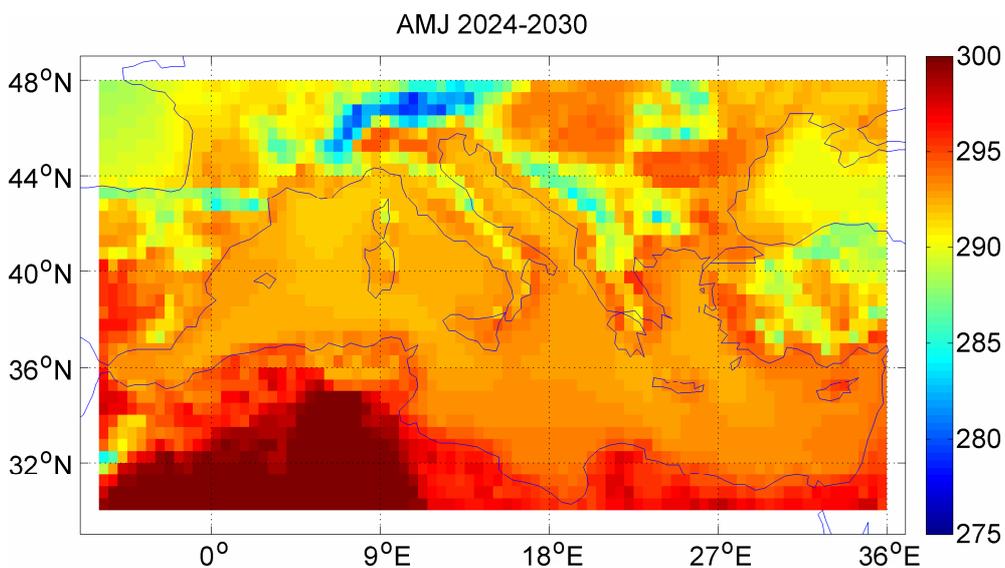
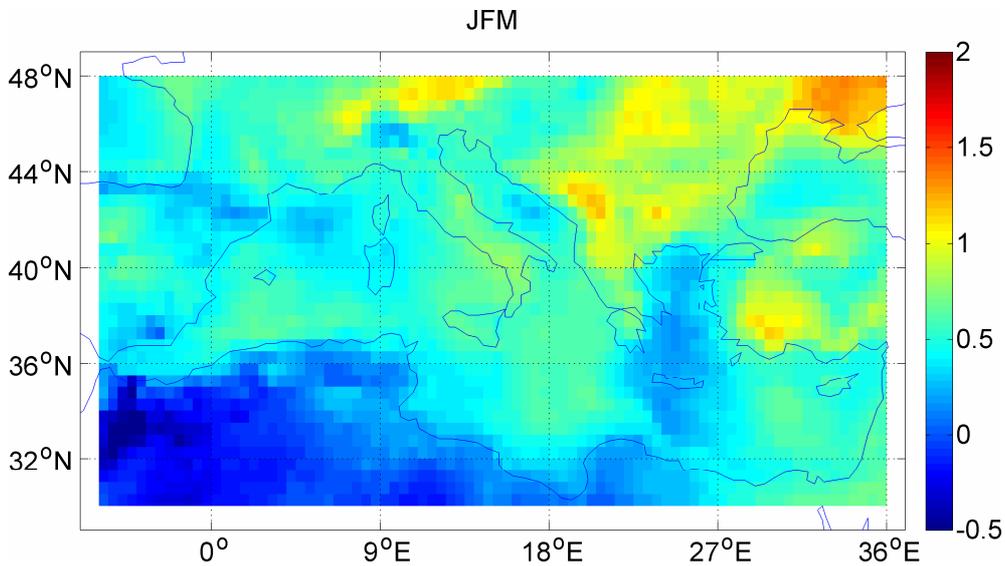


Fig. 36: Campo di temperatura a 2 metri, media stagionale primaverile, anni 2024-2030.

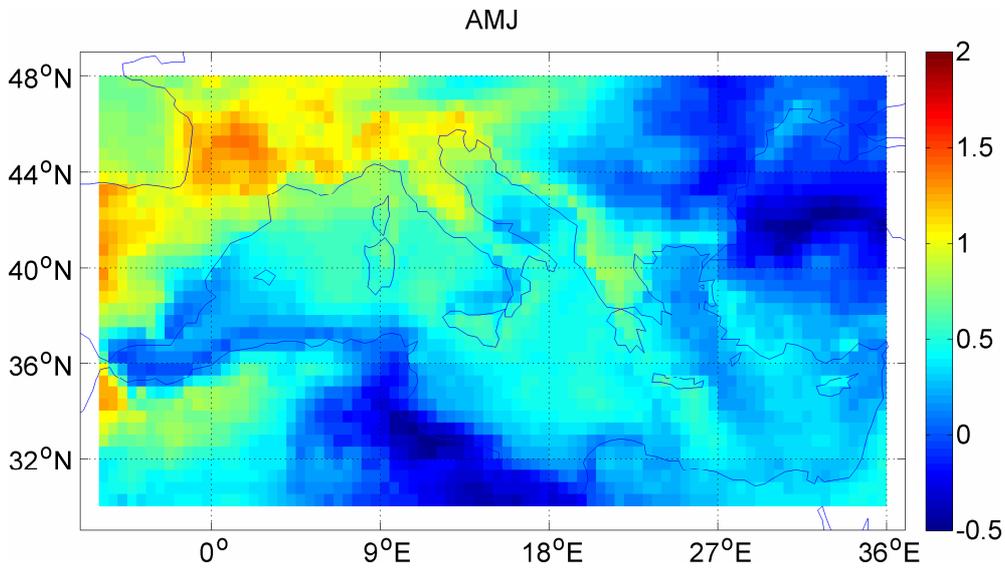


Fig. 37: Differenza del campo di temperatura a 2 metri, media stagionale primaverile.

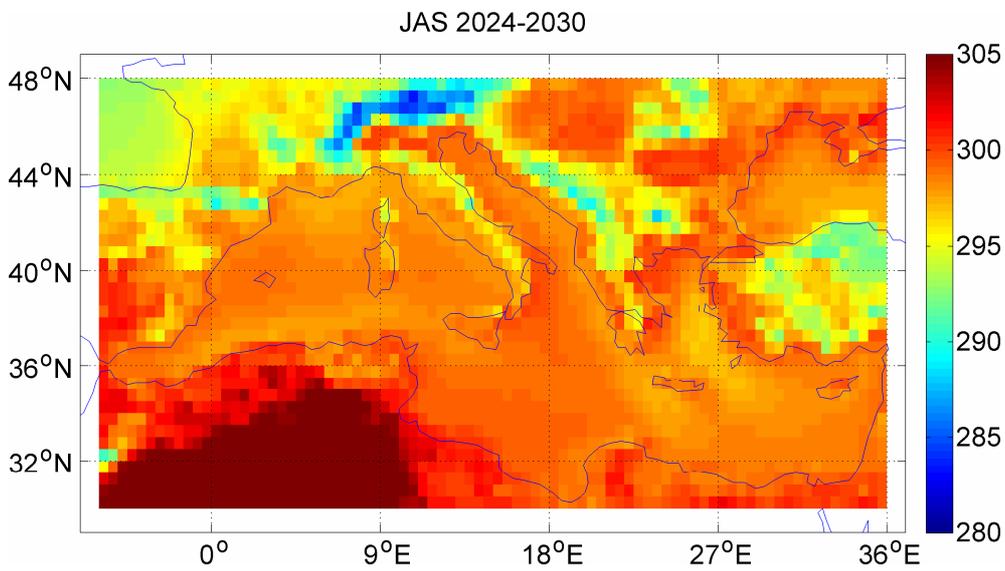
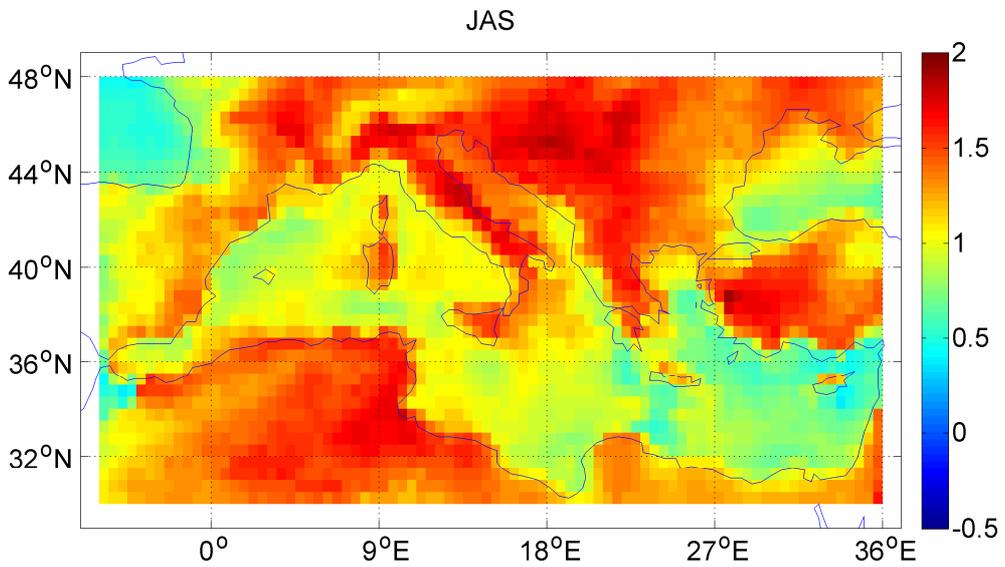


Fig. 38: Campo di temperatura a 2 metri, media stagionale estiva, anni 2024-2030.

Fig. 39: Differenza del campo di temperatura a 2 metri, media stagionale estiva.



OND 2024-2030

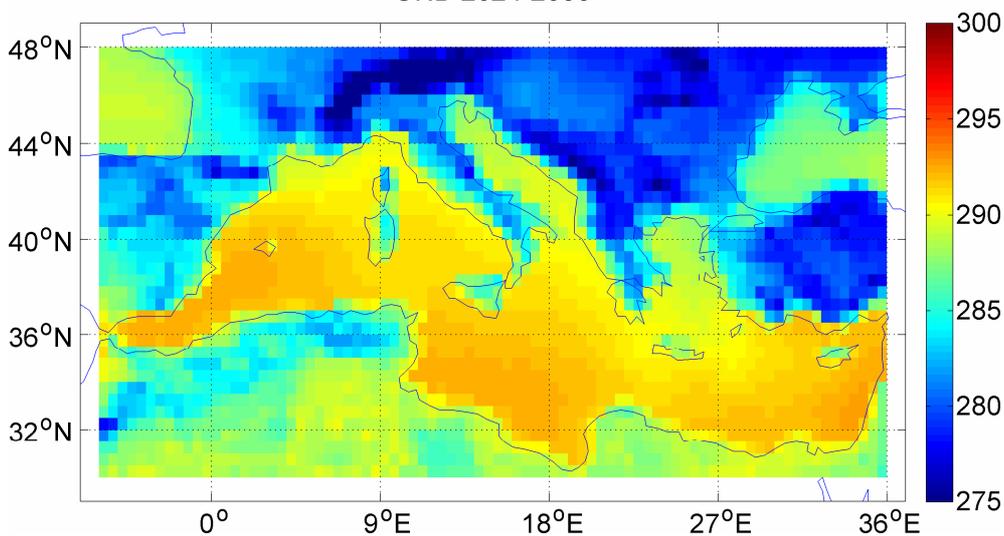
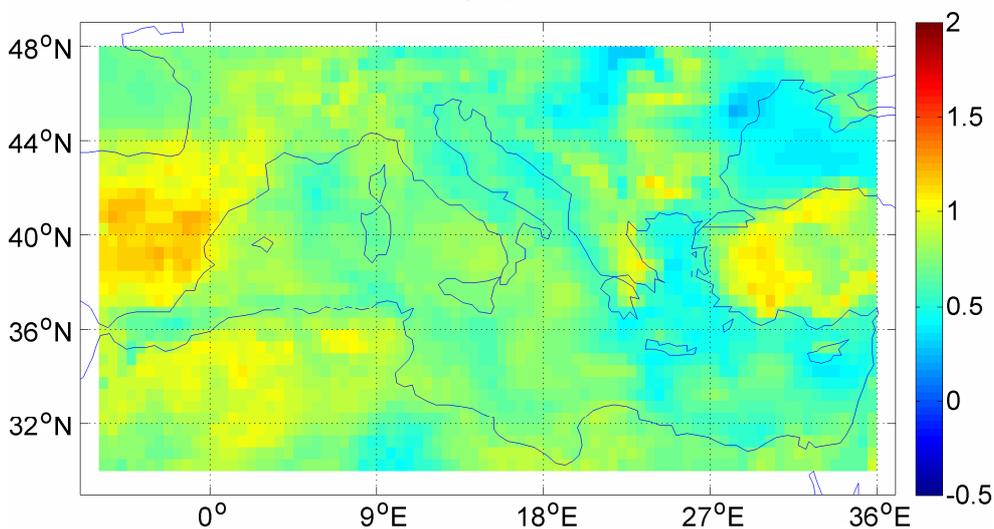


Fig. 40: Campo di temperatura a 2 metri, media stagionale autunnale, anni 2024-2030.

Fig. 41: Differenza del campo di temperatura a 2 metri, media stagionale autunnale.

OND



JFM EBU 2024-2030

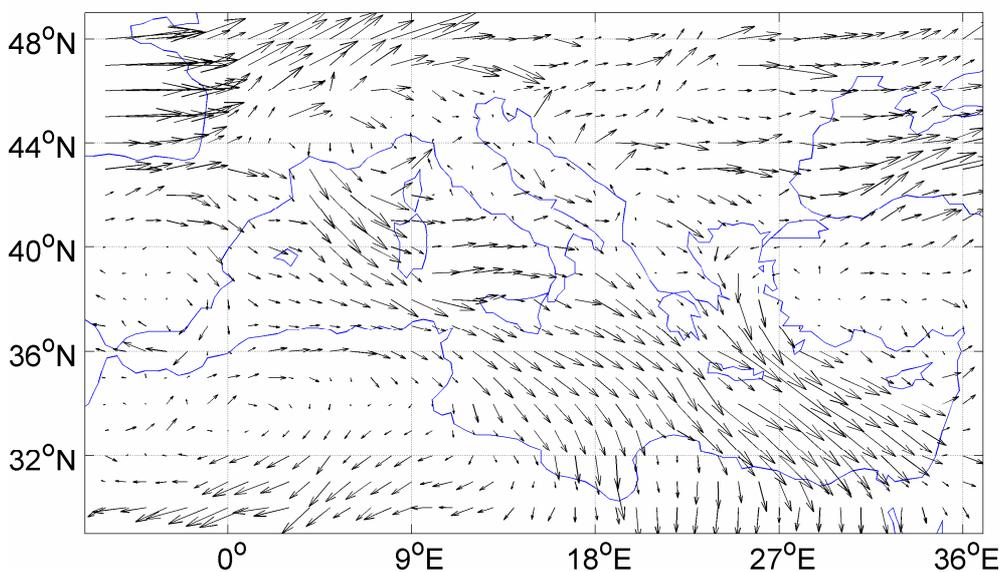


Fig. 42: Campo del vento a 10 metri, media stagionale invernale, anni 2024-2030.

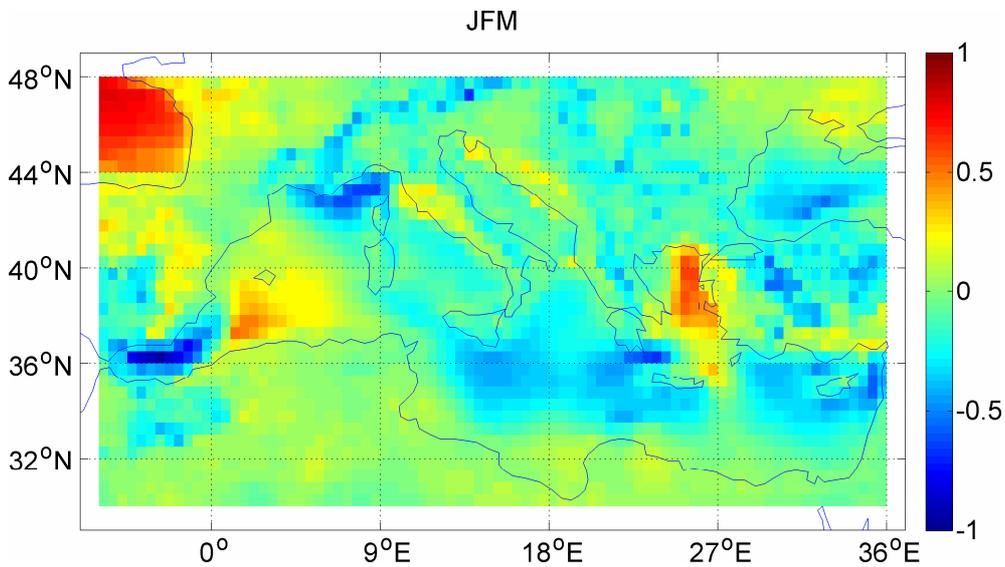


Fig. 43: Differenza del campo vento a 10 metri, media stagionale invernale.

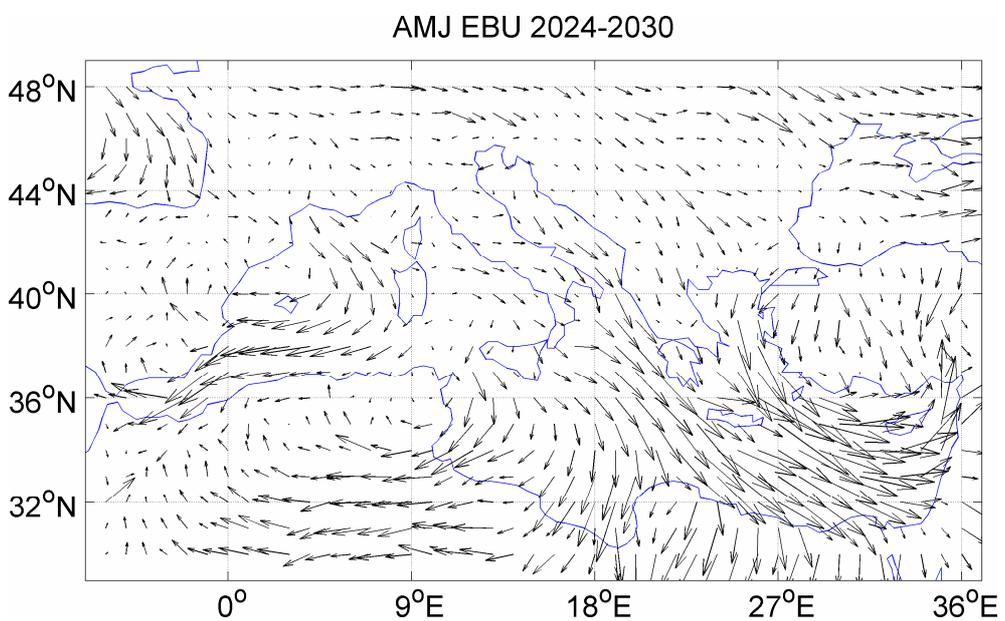
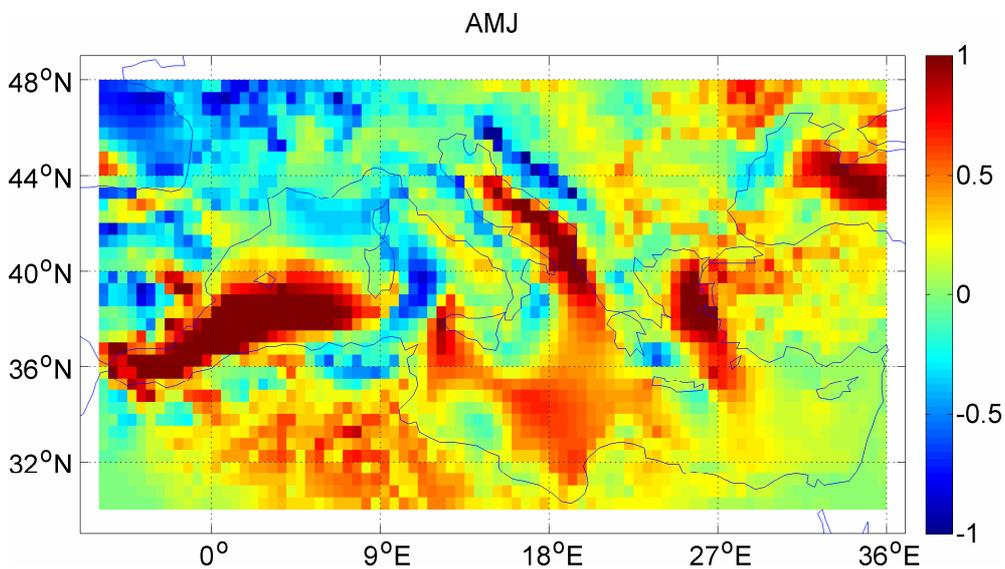


Fig. 44: Campo del vento a 10 metri, media stagionale primaverile, anni 2024-2030.

Fig. 45: Differenza del campo vento a 10 metri, media stagionale primaverile.



JAS EBU 2024-2030

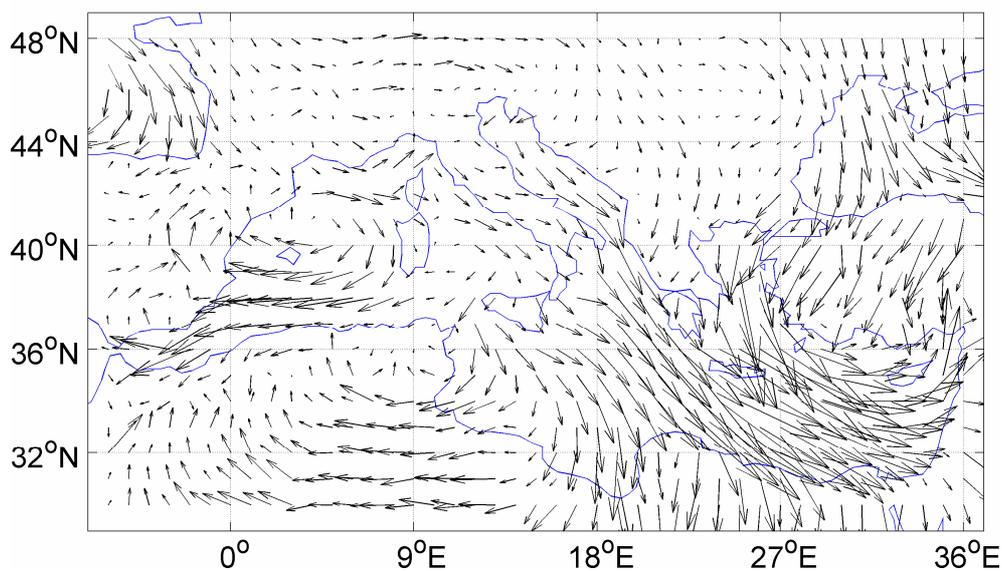
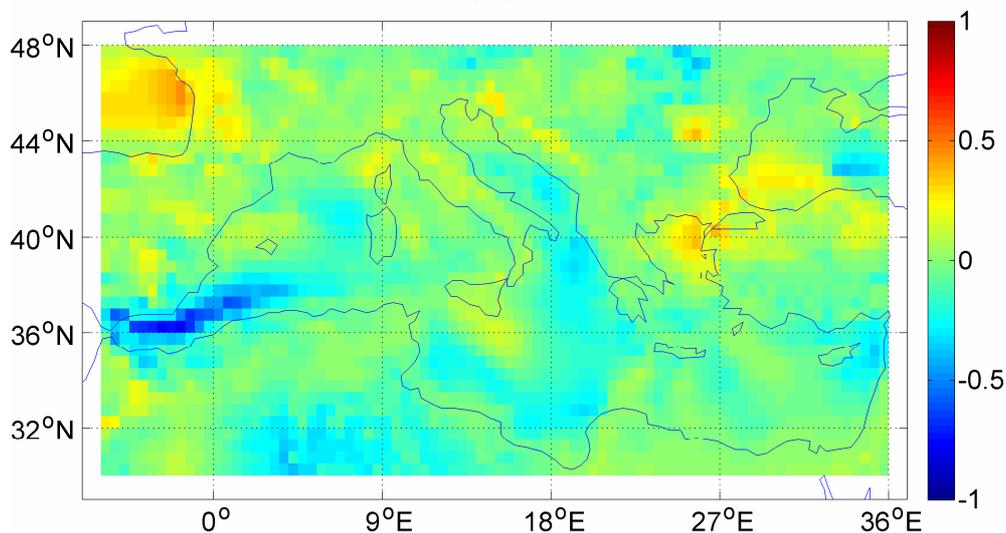


Fig. 46: Campo del vento a 10 metri, media stagionale estiva, anni 2024-2030.

Fig. 47: Differenza del campo vento a 10 metri, media stagionale estiva.

JAS



OND EBU 2024-2030

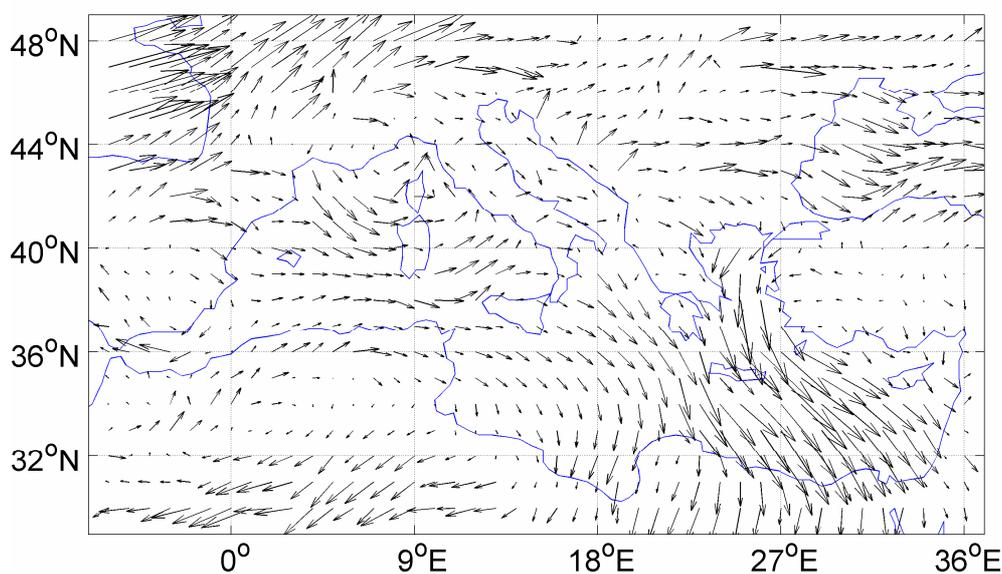


Fig. 48: Campo del vento a 10 metri, media stagionale autunnale, anni 2024-2030.

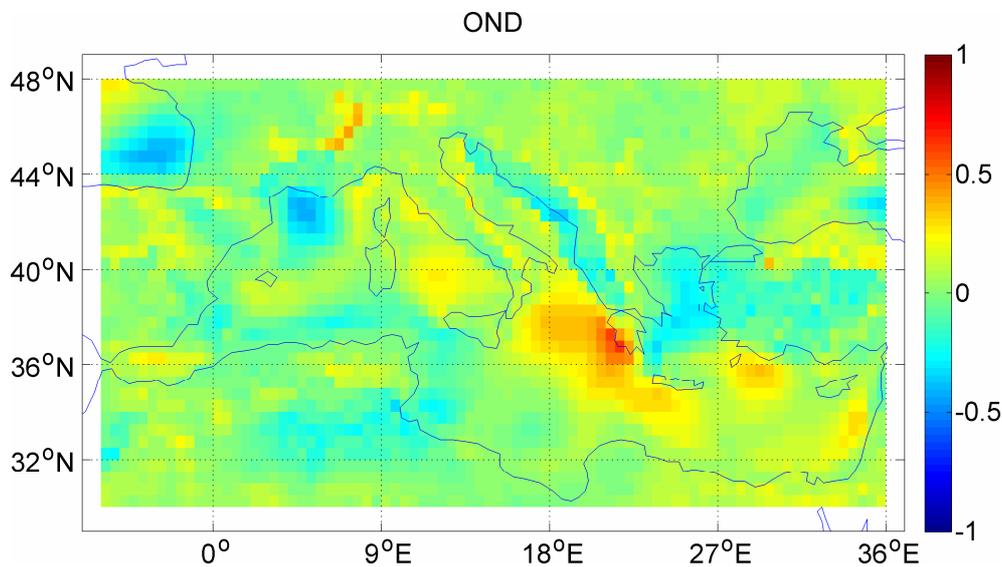


Fig. 49: Differenza del campo vento a 10 metri, media stagionale autunnale.

6. Conclusioni

6.1 Validazione del modello

Dall'analisi condotta è evidente come il confronto giorno per giorno e mensile tra l'integrazione realistica di ECMWF e la simulazione di scenario sia effettivamente poco indicativo. Dal confronto delle climatologie stagionali e delle medie annuali emerge che:

- Per la **temperatura dell'aria a due metri** il BIAS è in valore assoluto sempre piccolo e spesso positivo, anche se non emerge una particolare tendenza del modello a sottostimare o sovrastimare i campi. Il RMSE è di circa 3,3 °C nei punti di mare e non appare subire influenze stagionali. Dall'analisi punto per punto si può notare come il BIAS sia sempre negativo per la parte orientale del bacino e

positivo per quella occidentale. L'errore è notevolmente inferiore nei punti di mare rispetto a quelli di terra.

- Per il **modulo del vento a dieci metri** il BIAS sempre negativo su quasi tutto il bacino evidenzia una marcata tendenza del modello a sottostimare i valori del campo. Il RMSE è mediamente circa 4 m/s, con valori massimi di circa 4,5 m/s nella stagione invernale (JFM) e autunnale (OND). Il RMSE è notevolmente minore sui punti di terra.
- Per la **pressione al livello del mare** il BIAS è positivo per tutti gli anni in esame con un RMSE di circa 9 hPa. Dall'analisi delle climatologie si evidenzia come l'errore sia maggiore nei mesi autunnali e invernali, con BIAS positivi notevolmente più alti in valore assoluto rispetto alle altre stagioni e RMSE di circa 11 hPa.

6.2 Studio degli scenari futuri

Le simulazioni di scenario prevedono che fra trent'anni il clima del bacino Mediterraneo sarà caratterizzato da:

- Un aumento della **temperatura dell'aria sul mare** di circa 0,6 °C che potrà raggiungere circa 0,9 °C nella stagione estiva.
- Un leggero indebolimento dei **venti a dieci metri** di circa 0,06 m/s tranne che nella stagione invernale, in cui si potrà invece assistere a un leggerissimo rafforzamento di circa 0,02 m/s. Dall'analisi delle mappe emerge come questa tendenza non si manifesti uniformemente su tutto il bacino e su aree come l'Adriatico e parte del Mediterraneo orientale si potrà invece assistere a una tendenza di segno opposto.

Bibliografia:

Djurdjevic V., Rajkovic B. (2008). Description of the EBU-POM coupled regional climate model and results from time-slice climate change experiment for Mediterranean region. www.medclivar.eu

Gualdi S., Navarra A. (2005). Scenari Climatici nel bacino mediterraneo. *Forest@ 2* (1): 19-30.

IPCC (2000). Special Report on Emissions Scenarios. Nebojsa Nakicenovic and Rob Swart (Editor.). Cambridge University Press.

IPCC (2001). Climate Change 2001: The scientific basis. J.T. Houghton (Editor.). Cambridge University Press.

www.ecmwf.int

www.ingv.it

1. Introduzione	1
2. Sistema Climatico e Variabilità	3
3. Il modello EBU-POM	5
4. Validazione di EBU-POM	7
4.1 Confronto delle medie di bacino: T2m in °K	8
4.2 Confronto delle medie di bacino: SLP in hPa	13
4.3 Confronto delle medie di bacino: Modulo del Vento in m/s.....	17
4.4 Validazione del modello: Mappe.....	22
5. Studio degli scenari futuri	45
5.1 Studio degli scenari: Mappe	48
6. Conclusioni.....	55
6.1 Validazione del modello	55
6.2 Studio degli scenari futuri	56
Bibliografia:	57