



ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI SCIENZE

Corso di Laurea Triennale in Scienze Ambientali

Variazioni climatologiche della struttura termoalina del Mare Mediterraneo

Tesi di laurea in climatologia

Relatore:

Prof. Marco Zavatarelli

Presentata da:

Claudia Cristani

Correlatore:

Dott.ssa Simona Simoncelli

Sessione Anno accademico 2018/2019

INDICE

Abstract	5
CAPITOLO 1	6
INTRODUZIONE.....	6
1.1 Il Mare Mediterraneo.....	6
1.2 Circolazione Del Mar Mediterraneo.....	8
1.2.1 Circolazione Superficiale.....	9
1.2.2 Circolazione Intermedia.....	11
1.3 Variazioni nel tempo della circolazione del Mediterraneo.....	11
1.5 Processi di formazione delle masse d’acqua nel Mediterraneo negli ultimi 30 anni	13
1.5.1 Formazione delle acque profonde nel Golfo del Leone.....	14
1.5.2 Formazione delle acque profonde nell’Adriatico meridionale	15
1.5.3 Formazione delle masse d’acqua del Mar Levantino	17
1.5.4 Formazione delle masse d’acqua nel Mare di Creta	18
1.6 Obiettivi.....	19
CAPITOLO 2	21
DATI E METODI.....	21
2.1 Dati del World Ocean Atlas (WOA)	21
2.2 Metodi.....	23
2.3 Mappe di temperatura e salinità e distribuzione dei dati del Mediterraneo.....	25
CAPITOLO 3	42
RISULTATI.....	42
3.1 Profili di Anomalia nel Mar Mediterraneo	42
3.1.1 Mediterraneo Occidentale.....	42

3.1.2 Mediterraneo Orientale	44
3.3 Differenze tra i decenni 85-94 e 95-04.....	45
3.3 Profili di Anomalia nelle Regioni.....	49
3.3.1 Golfo Del Leone (Regione 3)	49
3.3.2 Ionio Settentrionale (Regione 6).....	51
3.3.3 Cretan Passage (Regione 10)	52
3.3.4 Rhode Gyre (Regione 11)	53
3.4 Diagrammi TS	54
3.4.1 Regione 3 (Golfo del Leone)	56
3.4.2 Regione 6 (Ionio Settentrionale).....	57
3.4.3 Regione 10 (Cretan Passage)	58
3.4.4 Regione 11 (Rhode Gyre)	59
CAPITOLO 4.....	61
CONCLUSIONI.....	61
BIBLIOGRAFIA.....	63

Abstract

La presente tesi si focalizza sull'analisi della struttura termalina del Mar Mediterraneo, sulla sua variazione decennale su base stagionale nell'arco di tempo compreso tra il 1955 e il 2017, a partire dalle mappe climatologiche fornite dal recente World Ocean Atlas 2018. L'obiettivo principale è quello di individuare e localizzare nello spazio e nel tempo le principali variazioni delle caratteristiche di temperatura e di salinità nel bacino Mediterraneo e dunque verificare che il data set utilizzato rappresenti tali variazioni secondo quanto riportato dalla recente letteratura scientifica.

Nell'introduzione vengono descritte le principali dinamiche della circolazione generale del Mar Mediterraneo, sia sullo strato superficiale che sullo strato intermedio della colonna d'acqua. Viene inoltre spiegata un'importante variazione della circolazione avvenuta nel Mar Ionio tra il 1996 e il 1997 e le sue conseguenze. In seguito sono discussi i processi e le regioni di formazione delle masse d'acqua: il Golfo del Leone, l'Adriatico Meridionale, il Mar Levantino e il Mare di Creta. Queste informazioni sono utili per capire appieno le variazioni di Temperatura e Salinità studiate dai dati del World Ocean Atlas (WOA2018), sia a scala di bacino che nelle regioni in cui avviene la formazione delle masse d'acqua. I dati sono stati elaborati con il software MATLAB. Le climatologie decadali per stagioni sono fornite su una griglia a 1/4 di grado di risoluzione orizzontale e su 102 livelli verticali.

Le mappe di temperatura e salinità del Mar Mediterraneo la loro distribuzione dei dati a profondità di 0m, 300m e 1000m sono presentate e analizzate per fornire un quadro generale del data set utilizzato ed il suo grado di incertezza. In seguito sono analizzati i profili verticali di anomalia delle due variabili sia del Mediterraneo Occidentale che in quello Orientale per identificare le principali variazioni di temperatura e salinità lungo la colonna d'acqua nel tempo. In seguito viene presentata l'analisi delle mappe di anomalia tra i decenni 1985/1994 e 1995/2004, periodo in cui è avvenuta un'importante variazione della circolazione superficiale nel Mar Ionio, in cui si individuano le aree in cui sono avvenute le principali variazioni. Infine lo studio si sposta sui profili verticali di anomalia e i diagrammi TS sulle quattro regioni dove avviene la formazione di masse d'acqua per verificarne i principali cambiamenti delle caratteristiche termoline nel periodo 1955-2017.

Si conclude che il WOA2018 è un data set affidabile e capace di rappresentare le principali variazioni decadali a scala di bacino, se pur ad una risoluzione bassa (1/4 di grado) rispetto ad altri prodotti di modellistica che oggi raggiungono 1/16 di grado.

CAPITOLO 1

INTRODUZIONE

1.1 Il Mare Mediterraneo

Il Mar Mediterraneo è un bacino semichiuso situato tra Europa, Nord-Africa e Asia Occidentale (Zenetos et al, 2004). La sua superficie è di circa 2.51 milioni di km² mentre la sua profondità media si aggira attorno a 1500 m con una profondità massima di 5270 m in prossimità delle coste del Peloponneso (Figura 1). Esso è soggetto ad una forte evaporazione e a un ridotto apporto di acque dolci fluviali. Il deficit idrico dovuto a questi due fattori viene compensato dall'immissione di acqua dall'Oceano Atlantico attraverso lo Stretto di Gibilterra che riversa ogni anno tra i 36000 e i 38000 km³ d'acqua. Questo apporto d'acqua in grandi quantità unito al restringimento dello stretto, che misura una profondità tra 400 e 700m e un'ampiezza tra i 14 e i 44 km, provoca grandi correnti durante tutto l'anno favorendo la pulizia dei bassi fondali dello stretto. In estate l'evaporazione è relativamente ridotta per via dei venti non molto frequenti, al contrario nei mesi invernali l'evaporazione è più elevata per la presenza di venti secchi di origine continentale.

A Est il Mar Mediterraneo è collegato al Mar Nero attraverso il Mar di Marmara, tramite gli stretti dei Dardanelli e di Bosforo. Spesso il Mar di Marmara è considerato parte del Mar Mediterraneo. A Sudest il Mediterraneo è collegato al Mar Rosso tramite il canale di Suez.

Le temperature medie dell'acqua hanno estremi compresi tra gli 11°C e i 32°C e solitamente si riscontrano temperature medie invernali attorno a 12-18°C e temperature medie estive tra 23-30°C.

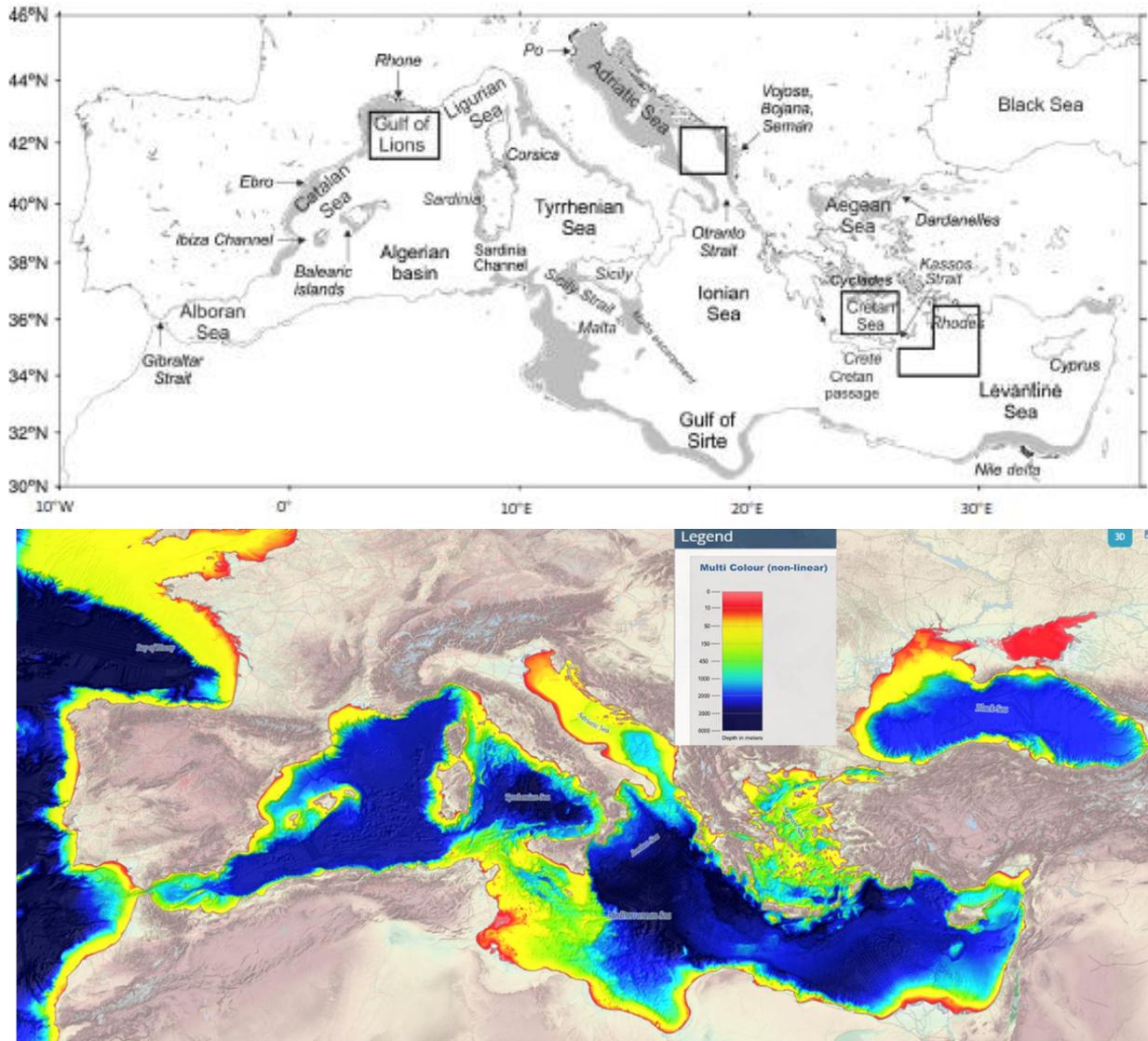


Figura 1: cartina dei mari del Mediterraneo (sopra) e carta batimetrica del Mar Mediterraneo (sotto)

Il mar Mediterraneo è suddiviso in due parti: il Mediterraneo occidentale, delimitato dal canale di Sicilia, e il Mediterraneo orientale.

Il Mediterraneo occidentale è costituito da due bacini principali: quello Alghero-Provenzale e quello Tirrenico. Il bacino Alghero-Provenzale comprende il Mare di Alboran, il mare delle Baleari, il Mare e il canale di Sardegna, il Mare di Corsica e il Mar Ligure. Il bacino Tirrenico, costituito dal Mar Tirreno, risulta la zona più profonda della parte occidentale del Mediterraneo, raggiungendo i 3800m di profondità nella Fossa del Tirreno (Figura 1).

Il Mediterraneo orientale è costituito dal Mare Adriatico, Mare Ionio, Mar Egeo, Mar Libico e bacino Levantino. Nel Mar Ionio è presente la fossa Calypso (Figura 1), il punto più profondo

di tutto il Mediterraneo, che arriva a una profondità di 5270 m. Inoltre, sempre nel Mar Ionio, si trova la piana abissale più estesa del Mediterraneo.

1.2 Circolazione Del Mar Mediterraneo

La circolazione superficiale del Mediterraneo è forzata dagli effetti combinati dei flussi di galleggiabilità e del vento. Questa è stata descritta in dettaglio da Pinardi et al. (2015) e rivista con dati di rianalisi aggiornati nella sezione 3.1 di Von Schuckmann et al. (2016).

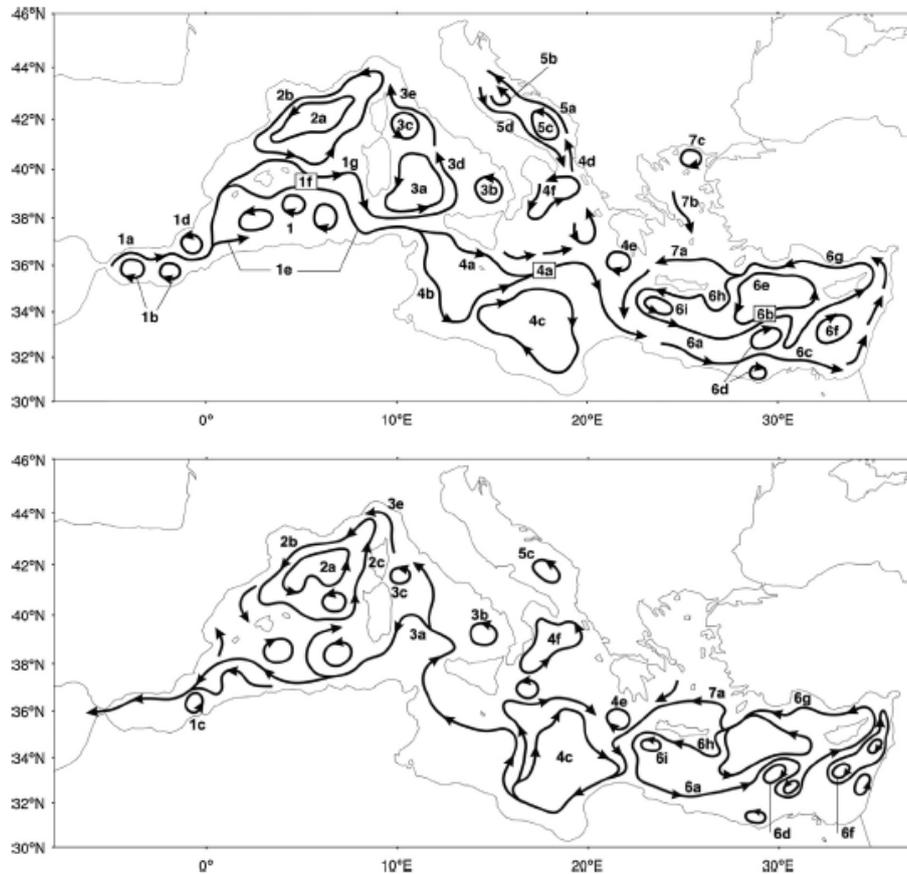


Figura 2: circolazione delle acque superficiali (sopra) e intermedie (sotto) del Mediterraneo

Nomenclature for the surface and intermediate depth circulation structures.	
Current systems	Components
System 1	1a: Atlantic Water Current (AWC) 1b: Western and Eastern Alboran Gyres 1c: Almera-Oran front 1d: Almera-Oran cyclonic eddy 1e: Algerian Current segments 1f: Western Mid-Mediterranean Current (WMMC) 1g: Southern Sardinia Current (SCC)
System 2	2a: Gulf of Lion Gyre (GLG) 2b: Liguro-Provençal-Catalan Current (LPCC) 2c: Western Corsica Current (WCC)
System 3	3a: South-Western Tyrrhenian Gyre (SWTG) 3b: South-Eastern Tyrrhenian Gyre (SETG) 3c: Northern Tyrrhenian Gyre (NTG) 3d: Middle Tyrrhenian Current 3e: Eastern Corsica Current (ECC)
System 4	4a: Atlantic-Ionian Stream (AIS) 4b: Sicily Strait Tunisian Current (SSTC) 4c: Syrte Gyre (SG) 4d: Eastern Ionian Current (EIC) 4e: Pelops Gyre (PG) 4f: Northern Ionian Cyclonic Gyre
System 5	5a: Eastern South-Adriatic Current (ESAC) 5b: Middle Adriatic Gyre 5c: South Adriatic Gyre 5d: Western Adriatic Coastal Current (WACC)
System 6	6a: Cretan Passage Southern Current (CPSC) 6b: Mid-Mediterranean Jet 6c: Southern Levantine Current (SLC) 6d: Mersa Matruh Gyre System (MMGS) 6e: Rhodes Gyre (RG) 6f: Shikmona Gyre System (SGS) 6g: Asia Minor Current 6h: Ierapetra Gyre (IPG) 6i: Western Cretan Cyclonic Gyre
System 7	7a: Cretan Sea Westward Current (CSWC) 7b: Southward Cyclades Current (SWCC) 7c: North Aegean Anticyclone

Tabella 1: nomi delle strutture di circolazione della Figura 2

1.2.1 Circolazione Superficiale

La corrente Atlantica (Figura 2) entra dallo stretto di Gibilterra e circola attorno a due vortici anticiclonici, i giri occidentale e orientale di Alboran (Juza et al., 2016). Si è osservato che questi giri possono alle volte sparire, in particolare il giro orientale di Alboran. Successivamente la corrente Atlantica gira attorno a una struttura ciclonica definita vortice ciclonico di Almera-Oran, per poi suddividersi in due correnti intense ad Est di Oran: una diretta verso Nordest lungo il canale Ibiza, mentre l'altro ramo diventa corrente Algerina. Quest'ultima perde intensità tra 4 e 8°E a causa di processi di instabilità (Cotroneo et al., 2016). La corrente costituita da acque atlantiche e diretta verso il canale Ibiza (Heslop et al., 2012), gira attorno all'isola di Maiorca dove si fonde con la corrente Liguro-Provenzale-Catalana e diviene la

corrente detta Western Mid Mediterranean Current (WMMC). Questa corrente scorre verso Sud lungo la costa occidentale della Sardegna e diventa la Southerly Sardinia Current (SSC), una delle correnti più ampie del Mediterraneo occidentale. Infine la corrente si dirige verso Est lungo le coste della Tunisia e si rimescola alla corrente Algerina attorno al 8°E.

Quando la corrente Algerina esce dal canale di Sardegna, si suddivide in 3 rami principali: il ramo diretto a Nord entra nel Mar Tirreno Meridionale, gli altri due flussi attraversano lo stretto di Sicilia.

La circolazione del Tirreno è dominata dal giro Sud-occidentale e dal giro settentrionale Tirrenico. Qui le correnti Orientale e Occidentale della Corsica fluiscono verso Nord attorno all'isola e vanno a formare parte del giro del golfo di Leone.

Relativamente alle due correnti che entrano nel Canale di Sicilia, una fluisce lungo la costa Tunisina ed è detta Sicily Strait Tunisian Current (SSTC), l'altra detta Atlantic Ionian Stream (AIS) circola verso Sudest lungo la costa Siciliana. La SSTC gira verso nord nel Golfo di Sirte formando due giri anticiclonici che costituiscono il sistema Syrte Gyre (Pinardi et al., 2006). L'AIS invece attraversa il Mar Ionio e a 36°N si divide in due rami. Al centro del Mar Ionio l'AIS gira verso Sud in direzione della costa Africana dove diventa un'intensa corrente costiera chiamata Cretan Passage Southern Current. Questa corrente successivamente si suddivide nel Mid Mediterranean Jet (MMJ) e nella Southern Levantine Current.

L'MMJ è un flusso che passa tra il Mesha-Matruh Gyre System a Sud e il Rhode Gyre a nord. La corrente quindi circola verso Est, a Sud del Cipro, attorno all'area di Shikmona Gyre System. Qui si fonde con la Southern Levantine Current formando la Cilician Current e poi l'Asia Minor Current. Parte dell'Asian Minor Current entra, attraverso lo Stretto di Kassos, nel Mare di Creta e forma la Cretan Sea Westward Current (CSWC). A Sudest di Creta è presente il IetraPetra Gyre (Robinson et al, 1991; Pujol e Larnicol, 2005), mentre a Sudovest si trova il Western Cretan Cyclonic Gyre.

I due mari marginali del Mediterraneo, l'Egeo e l'Adriatico generalmente mostrano una circolazione ciclonica. L'Adriatico è dominato da due giri ciclonici, i giri centrale e meridionale, inoltre sono presenti due sistemi di corrente: la corrente Adriatica orientale, diretta verso Nord, e la corrente Adriatica Costiera Occidentale, che va in direzione Sud.

1.2.2 Circolazione Intermedia

La circolazione intermedia (Figura 2) si riferisce al movimento delle correnti medie a una profondità tra i 200 e i 300m. Dello strato intermedio ne sono protagonisti le Acque Intermedie Levantine (LIW), acque formatesi nel bacino Levantino che fluiscono in direzione opposta a quelle dello strato superficiale e che escono dallo stretto di Gibilterra. Partendo quindi dal bacino Levantino la corrente segue la circolazione del Rhodes Gyre e del Passaggio di Creta. Il Mesha Matruh Gyre in profondità è costituito da una struttura multipolare dovuta alla formazione di un grande meandro della MMJ e dalla presenza di un anticiclone piuttosto ampio in prossimità delle coste egiziane. Si osserva che il Shikmona Gyre System è definito da un insieme di vortici anticiclonici semi-stazionari (Hecht et al., 1988; Brenner et al., 1991). Nel passaggio di Creta il movimento ciclonico delle correnti verso Ovest definisce chiaramente il giro ciclonico occidentale di Creta (Western Cretan Cyclonic Gyre, WCCG). Come in superficie, dove è presente la CSWC, anche in profondità questa struttura è ben definita. Qui la corrente fluisce attraverso lo stretto di Kithira e si dirama in tre correnti nel Mar Ionio. La prima forma la parte meridionale del Giro di Pelope, la seconda gira verso Est mentre la terza si unisce al flusso anticiclonico del Sirte Gyre. Dalla parte Ovest del Sirte Gyre si dirama la corrente della LIW, dirigendosi verso il Canale di Sicilia. Una volta entrata nel Mediterraneo Occidentale, la corrente LIW si divide in due rami a circa 6°E. Un ramo si dirige a Nord verso il Giro del Golfo di Lione, l'altro ramo della corrente invece si dirige a Ovest verso lo Stretto di Gibilterra.

È importante osservare, a queste profondità, la presenza di un vortice ciclonico chiamato Giro Ciclonico dello Ionio Settentrionale (Northern Ionian Cyclonic Gyre, NICG). Questo vortice, debolmente presente in superficie, mostra invece un sistema ciclonico più marcato alle medie profondità. Il NICG viene generato da escursioni medie e da instabilità dei meandri dell'AIS, processo che sarà descritto più dettagliatamente nel paragrafo 1.3.

1.3 Variazioni nel tempo della circolazione del Mediterraneo

Tramite lo studio di Pinardi et al. (2015) è stato identificato il più ampio evento decadale di variabilità dal 1987 chiamato Northern Ionian Reversal, o NIR. La circolazione media superficiale del Mar Ionio (Figura 3) dimostra che questo movimento, nella zona dello Ionio

Settentrionale, si invertì da anticiclonica (1987-1996) a ciclonica (1997-2006) e rimase tale anche dal 2007 al 2014. Tra il 1987 e il 1996 il Northern Ionian era caratterizzato da un movimento verso Nord dell'AIS. Poi dal 1997 al 2006 si notò che l'AIS attraversava il centro del bacino e il Northern Ionian era diventato ciclonico. Nel periodo dal 2007 al 2014 la circolazione ciclonica nello Ionio Settentrionale si indebolì e si formarono ai suoi lati orientale e occidentale vari vortici, tutti con circolazione ciclonica.

La circolazione anticiclonica del Nord dello Ionio è caratterizzata dal movimento verso Nordest dell'AIS, il quale trasporta le acque atlantiche verso il Sud del Mare Adriatico lungo il fianco occidentale dello Ionio, aumentando la galleggibilità dell'acqua e riducendo la sua capacità di formazione delle acque profonde.

La successiva circolazione ciclonica dello Ionio Settentrionale invece è associata al flusso verso Sudest dell'AIS che, trasportando le acque fredde Atlantiche verso il bacino Levantino, provoca un aumento della salinità dovuta all'afflusso di acque intermedie. Questo processo potrebbe favorire la formazione di masse d'acqua profonde nella regione tra il Sud dell'Adriatico e il Nord dello Ionio.

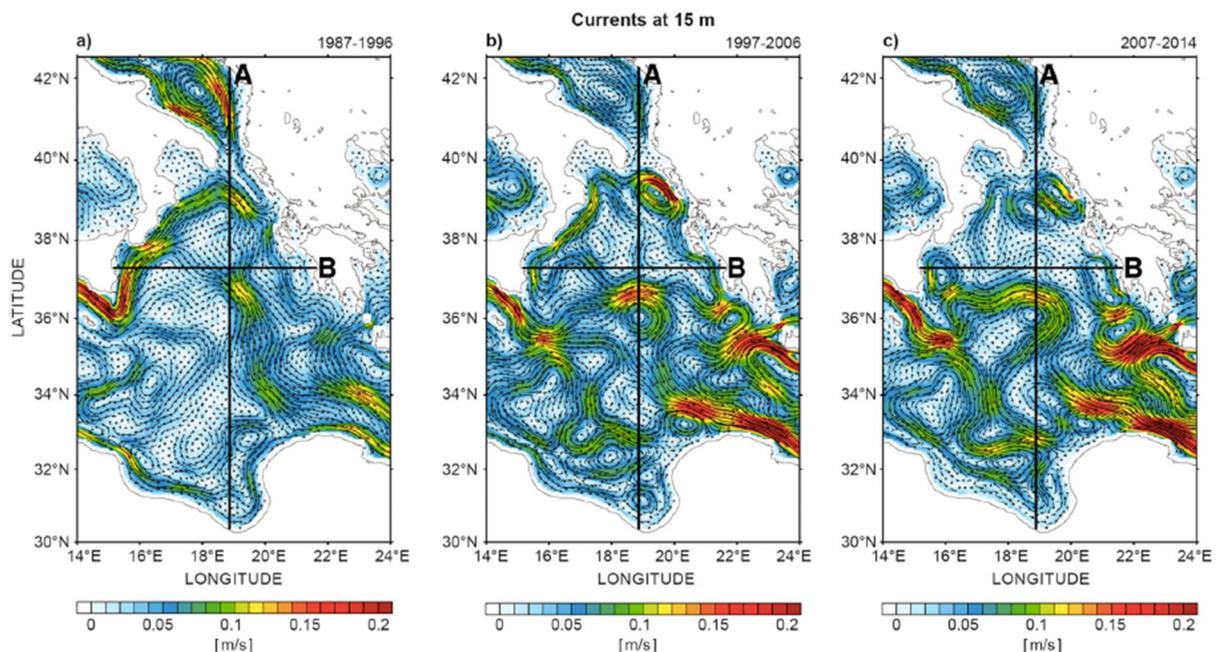


Figura 3: circolazione del Mar Ionio calcolato dal prodotto di rianalisi CMEMS nei tre periodi di tempo

Perciò la principale conseguenza della variabilità decennale descritta fu la salinizzazione del bacino Ionico settentrionale e l'afflusso di acqua più salata nell'Adriatico alle medie profondità (Figura 4). Si può notare, sempre in Figura 4, che dopo il 2007 la salinità aumentò tra i 200m e

i 400m sotto il livello del mare, presentando un valore massimo a 300m tra i 34°N e i 36°N. Nella sezione B (Figura 4) si può invece osservare la progressiva diffusione verso Ovest di acque intermedie del Levantino e di Creta con una salinità massima sul fianco orientale.

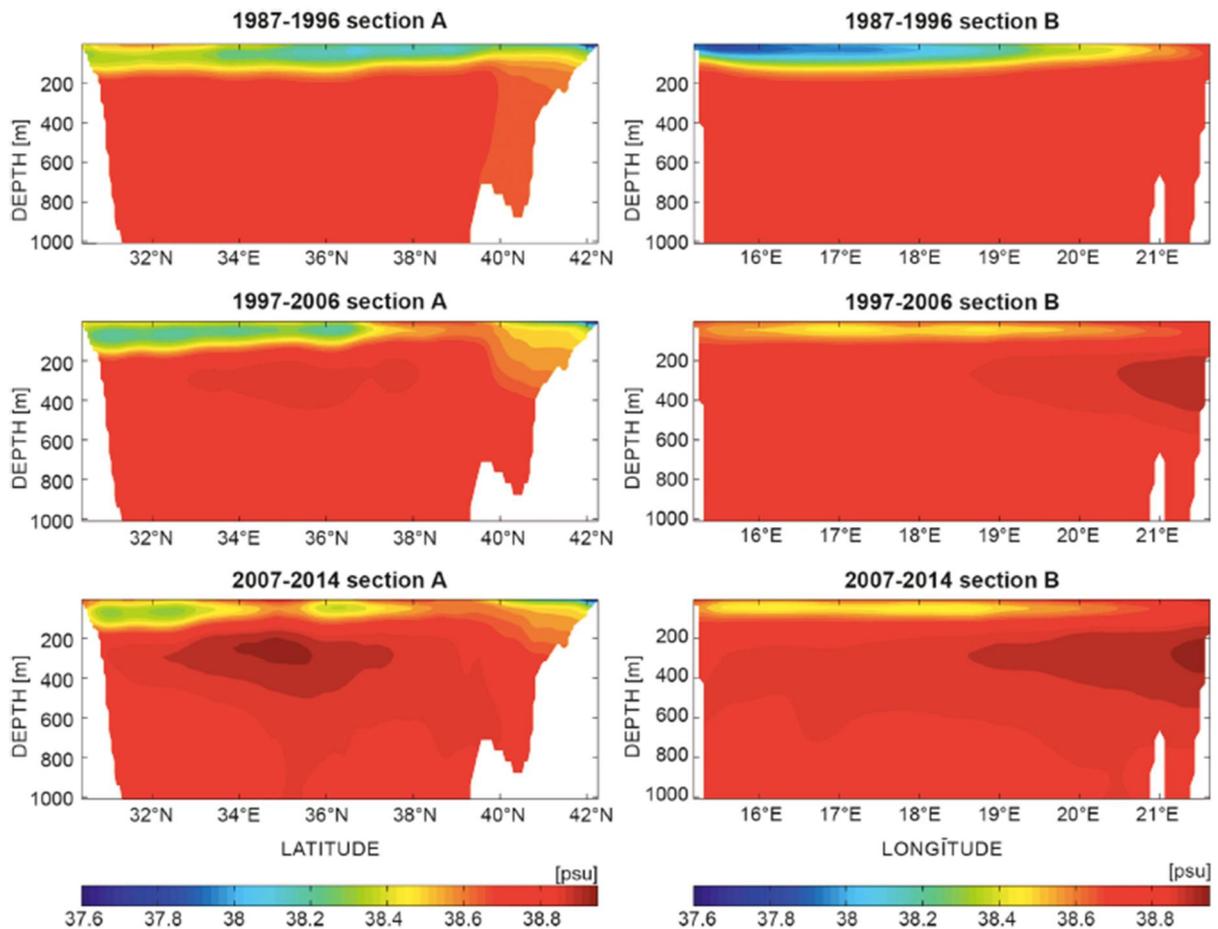


Figura 4: sezioni della salinità media meridionale e zonale calcolata dal prodotto di rianalisi CMEMS su 1000m per i tre periodi di tempo

In seguito a questo fenomeno fu osservata un'altra leggera inversione tra il 2006 e il 2011 (Bessieres et al. 2013) che potrebbe avere impattato sulla formazione delle masse d'acqua nel Mediterraneo Orientale.

1.5 Processi di formazione delle masse d'acqua nel Mediterraneo negli ultimi 30 anni

Uno dei processi più importanti che si verificano nel Mar Mediterraneo è la formazione di

masse d'acqua intermedie e profonde. Questo fenomeno prende parte al ribaltamento della circolazione e può variare in scale di tempo interannuali e multidecennali. Le regioni in cui si verificano eventi di formazione di acque intermedie e profonde, o di entrambe, sono quattro: il Golfo del Leone per le acque profonde del Mediterraneo occidentale (WMDW), la fossa del Mar Adriatico meridionale per le acque profonde del Mediterraneo orientale (EMDW), il Mare di Creta per le acque intermedie di Creta (Cretan Intermediate Waters, CIW) e le acque profonde di Creta (Cretan Deep Waters, CDW), e infine il giro di Rodi dove avviene la formazione delle cosiddette acque Levantine intermedie (Levantine Intermediate Waters, LIW) e acque Levantine profonde (Levantine Deep Waters, LDW).

L'analisi condotta da Simoncelli et al. (2014, 2016) è basata sugli eventi di formazione di masse d'acqua negli ultimi 30 anni. Il mese in cui si verificarono i maggiori eventi di convezione dello strato profondo fu febbraio e la climatologia mensile compiuta nell'arco di trent'anni, dal 1987 al 2016, mostra che le profondità nelle quali avvengono questi fenomeni sono di circa -250m nel Golfo del Leone (Somot et al., 2016), di -300m nell'Adriatico Meridionale, di -400m nel Mare di Creta e di -200m nel Rhode Gyre. Le mappe mensili di profondità degli strati convettivi tuttavia tendono a sottostimare la profondità locale dello strato misto il quale potrebbe estendersi fino al fondo del mare in alcuni giorni dell'anno. Per questo motivo si utilizzano stime giornaliere di profondità degli strati convettivi di mescolamento per migliorare il calcolo del luogo in cui avvengono le formazioni delle masse d'acqua.

1.5.1 Formazione delle acque profonde nel Golfo del Leone

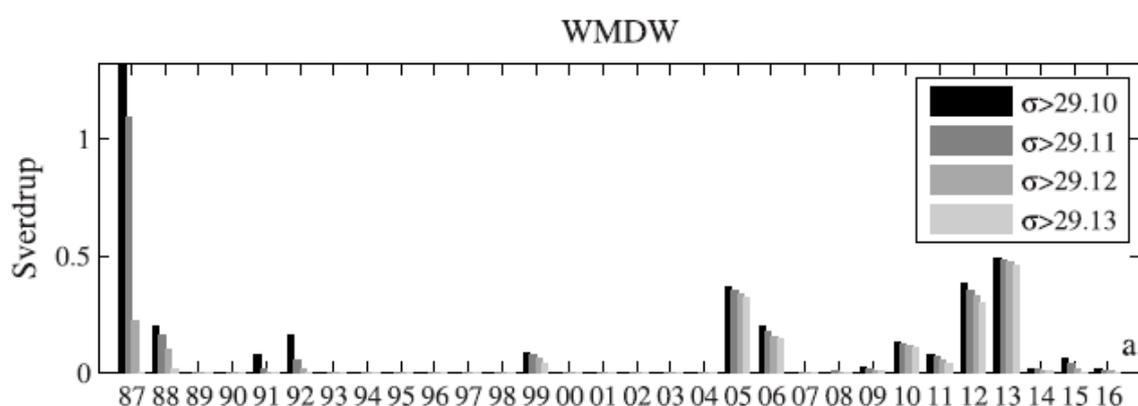


Figura 5: tassi di formazione delle masse d'acqua nel Golfo del Leone

Gli eventi di formazione di masse d'acqua profonde del Mediterraneo occidentale nel Golfo del Leone (Figura 5) avvennero nel 1987, 1988, 1991, 1992, 1999, 2005, 2006, 2010, 2011, 2012,

2013, osservando che l'anno in cui si riscontrò la maggiore densità dell'acqua fu il 1999, con una densità di $29,13 \text{ kg/m}^3$. Questa evidenza è coerente con Schroeder et al. (2006, 2008) il quale la collegò a un progressivo aumento di calore e di contenuto salino dello strato intermedio dovuto alla propagazione del Transiente del Mediterraneo Orientale dal bacino orientale a quello occidentale. Questa modifica delle caratteristiche delle masse d'acqua profonde del Mediterraneo occidentale, dopo il 2005, fu definita Transizione del Mediterraneo Occidentale.

1.5.2 Formazione delle acque profonde nell'Adriatico meridionale

Un'altra zona di formazione delle acque profonde si riscontra tra il Mar Ionio settentrionale e il Mar Adriatico Meridionale. Qui avviene lo scorrimento delle acque profonde dell'Adriatico lungo la piana abissale dello Ionio (Figura 6) che genera così la massa d'acqua profonda del Mediterraneo Orientale.

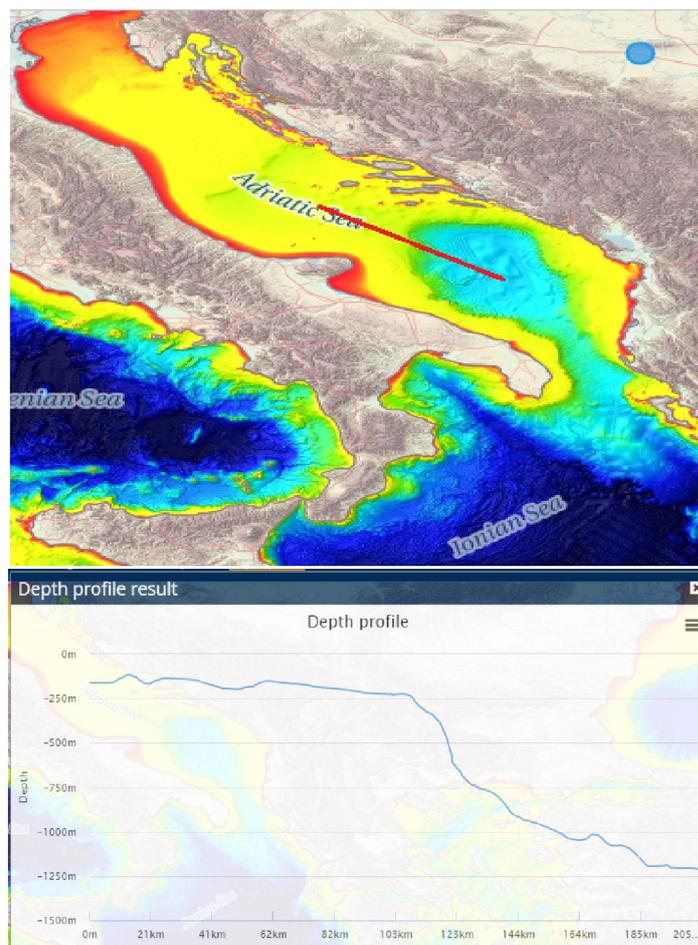


Figura 6: sezione frontale della piana abissale del Mar Ionio

La cella di ribaltamento della circolazione del Mediterraneo Centrale è in competizione con un'altra cella: la cella di ribaltamento del Mar Egeo Meridionale. Questa cella tra gli anni '80 e gli anni '90 fu predominante durante il Transiente del Mediterraneo Orientale formando nuove masse d'acqua profonda di Creta più salate e più dense delle acque profonde preesistenti nel Mediterraneo Orientale. Questa competizione tra celle sembra essere collegata a un altro fenomeno avvenuto nel Mar Ionio Settentrionale di circolazione superiore termoalina (Gačić et al. 2011; Theocharis et al. 2014; Velaoras et al. 2014; Bensi et al. 2016). Il Transiente del Mediterraneo Orientale coincise con il cambiamento della Circolazione Ionica Settentrionale da movimento anticiclonico a ciclonico avvenuto tra il 1987 e il 1996 (Pinardi et al., 2015) e rimasto prevalentemente ciclonico fino al 2016.

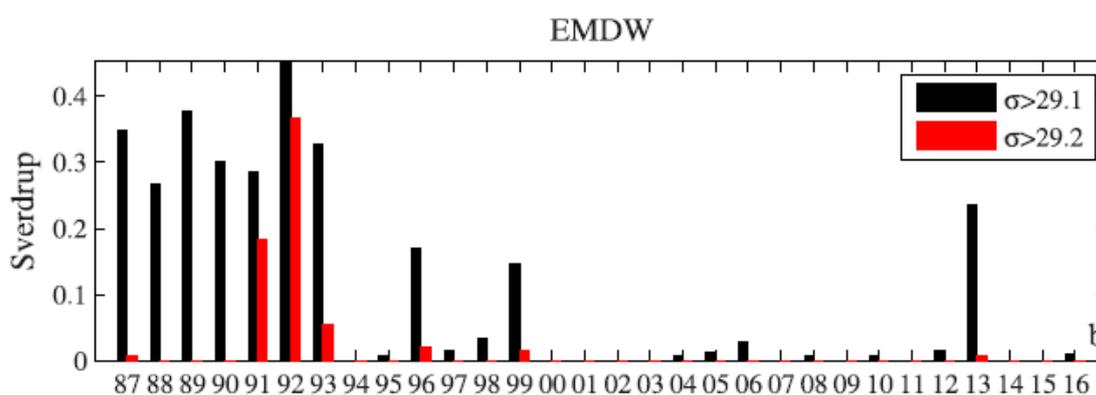


Figura 7: tassi di formazione delle masse d'acqua nell'Adriatico Meridionale

La formazione di acque profonde del Mediterraneo Orientale nella regione del bacino del Mare Adriatico Meridionale in Figura 7 mostra un periodo di formazione di masse d'acqua ininterrotta tra il 1988 e il 1993, in accordo con quanto descritto da Pinardi et al. (2015), e con tassi di trasporto del volume compresi tra 0,27Sv (Sverdrup) nel 1988 e 0,43Sv nel 1992. Lo Sverdrup è un'unità di misura che calcola il trasporto di volume di una sostanza e misura $10^6 \text{ m}^3/\text{s}$. L'acqua profonda del Mediterraneo Orientale formatasi nel 1991 e nel 1992 è costituita da valori di densità più elevati, superiori a $29,2 \text{ kg/m}^3$ (barre rosse). Altri eventi di formazione si sono verificati nel 1996 con 0,18Sv e nel 1999 con 0,15Sv, entrambi documentati da Manca et al. (2002) che osservò la convezione in mare aperto fino a profondità intermedie con un range di densità di circa $29,16\text{-}29,17 \text{ kg/m}^3$. La debole formazione di acque profonde verificatasi nell'inverno 2006 ed evidente in Figura 7 è confermata dalle osservazioni di Viblic e Santic (2008). Un altro intenso evento di formazione di masse d'acqua è stato infine rilevato nel 2013,

di 0,23Sv, e sebbene questo sia stato rilevato dai galleggianti Argo esso non è stato ancora riportato in letteratura.

1.5.3 Formazione delle masse d'acqua del Mar Levantino

Nel Mar Levantino avviene l'ascesa dell'AIS, ciò è dovuto principalmente all'influenza di forzanti atmosferici e a una preconditione di salinità che inducono alla formazione di acque intermedie. Le regioni del Mar Levantino Settentrionale e del Mare di Creta sono infatti associate alla rispettiva formazione della massa d'acqua intermedia del Levantino (Levantine Intermediate Water, LIW) e della massa d'acqua intermedia di Creta (Cretan Intermediate Water). Le acque intermedie influenzano il ribaltamento della circolazione Sud-occidentale, circolazione innescata dal processo di formazione delle acque profonde che si verificano a largo del Golfo del Leone.

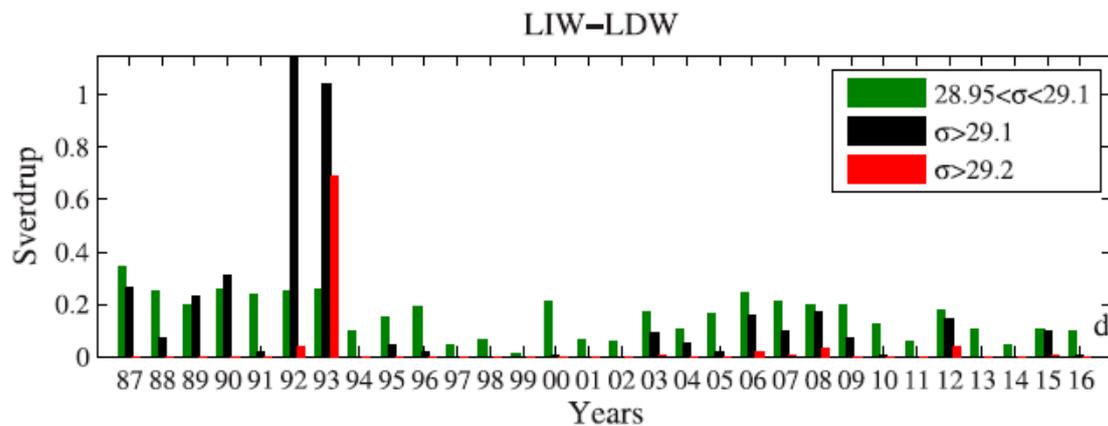


Figura 8: tassi di formazione delle masse d'acqua nel Mar Levantino

Il tasso di formazione delle acque profonde Levantine nella regione del Rhode Gyre (Figura 8) mostra i valori più ampi tra il 1992 e il 1993, con valori maggiori di 1Sv quando la densità dell'acqua è superiore a 29,1 kg/m³ (nel 1992) e superiore a 29,2 kg/m³ (nel 1993), in accordo con Kontoyiannis et al. (1999). Osservando i volumi di acqua più densa di 29,1 kg/m³ sono stati rilevati tassi di 0,2Sv nel 1987, 1989, 1990, 2006, 2008, 2012 e circa 1Sv nel 1988, 2003, 2007, 2009 e 2015. Un piccolo evento è stato rilevato anche nel 1995, come osservato dal gruppo Liwex (2003). Sapendo che l'intervallo di densità delle masse d'acqua intermedie Levantine risulta tra 29,85 e 29,1 kg/m³, furono rilevati tassi di formazione oscillanti tra 0,1 e 0,2Sv con valori più bassi tra il 1997-1999, il 2001-2002, il 2011 e il 2014. Durante il periodo in cui avvenne il Transiente del Mediterraneo Orientale (1988-1993) il tasso di formazione si rilevò intorno a 0,2Sv e lo stesso avvenne durante il periodo 2006-2009, periodo in cui si formarono anche le acque intermedie di Creta.

1.5.4 Formazione delle masse d'acqua nel Mare di Creta

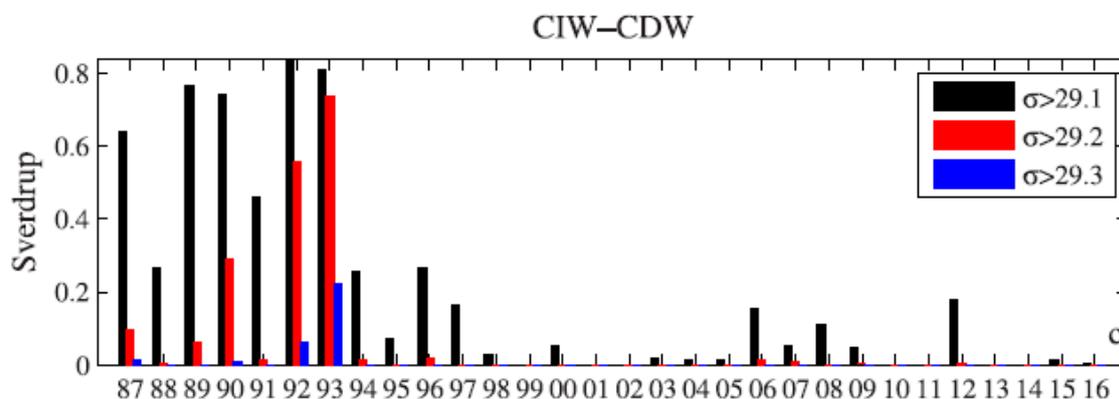


Figura 9: tassi di formazione delle masse d'acqua nel Mare di Creta

Il Mare di Creta (Figura 9) presenta il più grande tasso di formazione di massa d'acqua tra il 1989 e il 1993, con picchi di 0,8Sv nel 1992 e nel 1993. Questi eventi descrivono il fenomeno del Transiente del Mediterraneo Orientale. Le masse d'acqua di Creta formate nel 1992 e nel 1993 sono caratterizzate dalle più alte densità dell'intero periodo, con valori dominanti superiori a $29,2 \text{ kg/m}^3$ (barre rosse) e una piccola frazione più densa di $29,3 \text{ kg/m}^3$ (barre blu) in accordo con Velaoras et al. (2014). I tassi di formazione delle masse d'acqua intermedie di Creta caratteristiche del 1988, 1994 e 1996 mostrano valori di 0,2 e 0,3Sv mentre nel 1997, 2006, 2008 e 2012 sono stati stimati valori tra 0,1 e 0,2Sv con densità inferiori alle precedenti. Schroeder et al. (2013) osservarono che a Nordest dell'isola di Creta, sul fondo dello stretto di Antikythira, si svilupparono episodi di deflusso di acque dense nel corso del 2007-2009 con densità variabili tra $29,19$ e $29,2 \text{ kg/m}^3$, in accordo con gli eventi di formazione del 2006-2008. Krokos et al. (2014) invece indicarono che la formazione di masse d'acqua densa prese posto nel Mar Egeo pochi anni dopo la deflessione dell'AIS verso il Nord dello Ionio e il conseguente disturbo della cella termoalina del Mediterraneo Orientale. Velaoras et al. (2014) denominarono questa massa d'acqua, che si depositò in profondità al di sotto delle masse d'acqua intermedie Levantine, la massa d'acqua densa intermedia Cretese ($29.1 < \sigma < 29.2 \text{ kg/m}^3$).

Il periodo del Transiente del Mediterraneo Orientale coincise con il movimento anticiclonico del NICG (Pinardi et al., 2015) e apparve caratterizzato dalla formazione in parallelo di masse d'acqua profonde del Mediterraneo Orientale (0,2-0,45Sv) e delle masse d'acqua profonda di Creta (0,3-0,8Sv) con acque prevalentemente più dense di $29,2 \text{ kg/m}^3$ nel 1991-1992 nell'Adriatico Meridionale e nel 1992-1993 nel Mare di Creta, dove si riscontrano valori

superiori a $29,3 \text{ kg/m}^3$. Nel Levantino Settentrionale le masse d'acqua profonde si formarono in modo intenso nel 1992 e nel 1993; anche qui si riscontrarono valori di densità superiori a $29,3 \text{ kg/m}^3$. Dopo il 1993, gli eventi di formazione delle masse d'acqua nel Mediterraneo Orientale ridussero la loro frequenza e intensità, mostrando un ritorno dopo il 2005 nella regione del Rhode Gyre e nel mare di Creta quando la circolazione dello Ionio Settentrionale tornò anticiclonica (Bessieres et al.,2013). Il periodo 2012-2013 fu caratterizzato dalla formazione di masse d'acqua nelle quattro regioni, mentre il 2016 non presentò eventi significativi di formazione delle masse d'acqua profonde.

1.6 Obiettivi

La presente tesi ha come obiettivo principale lo studio delle variazioni termoaline a scala di bacino nel Mar Mediterraneo e in alcune regioni specifiche in cui avviene la formazione delle masse d'acqua. Tali regioni sono: il Golfo del Leone e il l'Adriatico Meridionale in cui avviene la formazione di masse d'acqua profonde, il Mare di Creta e il Levantino per la formazione di masse d'acqua intermedie e profonde che avviene in entrambe le regioni. Anche lo Ionio settentrionale è importante perché è la regione in cui è avvenuta la principale variazione della circolazione tra il 1987 e il 2006, ovvero il Northern Ionian Reversal, che ha causato importanti conseguenze idrodinamiche. Lo studio si basa sui dati del World Ocean Atlas 2018 (WOA2018, *Locarnini et al. 2019* and *Zweng et al., 2019* both in preparation) rilasciati il 30 settembre 2018. Il data set in esame comprende medie climatologiche decennali di temperatura e salinità a risoluzione temporale stagionale e copre un periodo che va dal 1955 al 2017. Altro obiettivo è quello di verificare se il WOA2018 sia in grado di riprodurre le principali caratteristiche termoaline e le loro variazioni a partire dal 1955.

La tesi è suddivisa in quattro capitoli. Nel **Capitolo 1** viene svolta un'introduzione al Mar Mediterraneo, le sue proprietà e le circolazioni delle correnti e livello superficiale e intermedio. Vengono inoltre descritti gli eventi del Northern Ionian Reversal e delle formazioni delle masse d'acqua. Nel **Capitolo 2** due sono descritti i dati utilizzati, i metodi con cui questi sono stati elaborati, la suddivisione del Mar Mediterraneo in regioni e gli andamenti generali della temperatura e della salinità nei vari periodi di tempo. Il **Capitolo 3** descrive i risultati ottenuti. Qui sono descritti i profili verticali di anomalia del Mar Mediterraneo Occidentale e Orientale

per mostrare gli andamenti generali di temperatura e salinità nelle due parti del bacino. I profili verticali di anomalia sono stati poi elaborati anche per le regioni in cui avviene la formazione delle masse d'acqua. In seguito sono mostrate le mappe di anomalie di temperatura e salinità tra le decadi 1985-1994 e 1995-2004, ovvero nel periodo in cui si è verificato il Northern Ionian Reversal. Sempre per le regioni che presentano eventi di formazione delle masse d'acqua sono stati elaborati dei diagrammi TS. Nel **Capitolo 4** infine sono discusse le conclusioni.

CAPITOLO 2

DATI E METODI

2.1 Dati del World Ocean Atlas (WOA)

Il World Ocean Atlas è un set di campi riguardanti medie climatologiche oceanografiche prodotti dall'Ocean Climate Laboratory del National Oceanographic Data Center (ora conosciuto come National Center for Environmental Information, o NCEI) in collaborazione con il National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Questo progetto si è sviluppato sulla base del Climatological Atlas of the World Ocean, programma costituito da campi climatologici a disponibilità pubblica e ideati da Sydney Levitus nel 1982. Il WOA infatti ha lo scopo di rendere facilmente reperibili dati oceanografici di qualità tramite dei databases online. Le serie del WOA si basano sui dati del World Ocean Database (WOD), la più grande collezione internazionale di profili oceanografici, disponibile senza restrizioni di accesso. Il WOD permette inoltre di fornire riproducibilità al WOA.

La nuova versione WOA2018 è stata aggiornata il 30 settembre 2018 e contiene circa 3 milioni di nuovi dati aggiunti al WOD (<https://www.nodc.noaa.gov/cgi-bin/OC5/woa18/woa18.pl>).

I campi medi climatologici sono stati analizzati con diverse risoluzioni spaziali a 5, 1 e 1/4 di gradi latitudine/longitudine, mentre i dati statistici utilizzati nel controllo qualità, che però non sono oggettivamente analizzati nelle medie climatologiche, sono disponibili a una risoluzione spaziale di cinque gradi latitudine/longitudine. I campi statistici sono stati calcolati per sei variabili oceanografiche: temperatura, salinità, ossigeno disciolto, nitrato, fosfato e silicato. A causa dell'irregolarità dei dati nella distribuzione spaziale e temporale a varie profondità, non tutte le variabili sono state analizzate a tutte le profondità per tutti i periodi di media. Per i parametri utilizzati in questa tesi, ovvero di temperatura e salinità, è possibile ottenere medie climatologiche fino a una profondità di -5500m per climatologie annuali e stagionali e fino a -1500m per climatologie mensili.

Le medie climatologiche sono state calcolate in intervalli di tempo di 10 anni, partendo dal 1955 fino al 2017. È stato scelto di iniziare con la decade 1955-1964 perché è il primo decennio contenente dati sufficienti per poter calcolare le medie. Ogni decennio contiene la media climatologica totale calcolata su tutti gli anni e le medie climatologiche suddivise per stagioni di tutti gli anni. Ogni stagione prende in considerazione tre mesi e inizia con l'inverno che contiene i mesi di gennaio, febbraio e marzo. Nell'ultimo intervallo di tempo, ovvero dal 2005 al 2017, la media è stata calcolata su 13 anni e non su 10.

Field Name	Quarter-degree field calculated	One-degree field calculated	Five-degree field calculated	Field Type Code (for file names)
Objectively analyzed climatology	√	√		an
Statistical mean	√	√	√	mn
Number of observations	√	√	√	dd
Seasonal or monthly climatology minus annual climatology	√	√		ma
Standard deviation from statistical mean	√	√	√	sd
Standard error of the statistical mean	√	√	√	se
Statistical mean minus objectively analyzed climatology	√	√		oa
Number of mean values within radius of influence	√	√		gp

Tabella 2: campi statistici analizzati oggettivamente

La Tabella 2 presenta l'elenco dei campi statistici che vengono forniti alla risoluzione della griglia selezionata (5, 1 o ¼ di grado), poiché calcolati all'interno di ciascun intervallo di latitudine/longitudine su ogni livello.

Le climatologie oggettivamente analizzate (an) sono i campi medi che risultano per una variabile oceanografica a livelli di profondità standard per l'Oceano Mondiale.

La statistica media (mn) è la media di tutti i dati interpolati che superano i controlli di qualità ad ogni livello di profondità standard e per ogni variabile a un quarto di grado, un grado o cinque gradi i quali contengono almeno una misurazione per la variabile oceanografica data.

Il numero di osservazioni (dd) di ciascuna variabile in ogni quarto di grado, un grado o cinque gradi del World Ocean a ciascun livello di profondità standard che supera i controlli di qualità.

La climatologia stagionale o mensile meno la climatologia annuale (ma) a ciascun quarto di grado o grado ad ogni profondità standard.

La deviazione standard dalla media statistica (sd) di ciascuna variabile in ciascun quarto di grado, un grado o cinque gradi ad ogni livello di profondità standard che supera i controlli di qualità.

L'errore standard della media (se) di ciascuna variabile in ciascun quarto di grado, un grado o cinque gradi a ciascun livello di profondità standard che supera i controlli di qualità.

La media statistica meno la media climatologica (oa) a ogni quarto di grado o un grado ad ogni profondità standard. Questo valore viene utilizzato come stima dell'interpolazione e dell'errore di livellamento.

Il numero di intervalli lat/lon considerati nell'analisi poiché' ricadenti all'interno del raggio di influenza (gp) intorno a ciascun intervallo che contenga un valore medio statistico.

2.2 Metodi

I dati d'interesse sono stati scaricati dal sito del WOA in formato NetCDF. Il NetCDF, o Network Common Data Form, permette di accedere a dati organizzati in matrici e può essere letto da programmi in linguaggi C, C++, Fortran, Java e altri ancora. Il programma utilizzato per leggere i file in NetCDF è MATLAB. Quest'ultimo è un software creato dalla MathWorks in linguaggio C ed è utilizzato per analisi numeriche e calcoli statistici. MATLAB è l'abbreviazione di MATrix LABoratory e permette infatti di lavorare con matrici e vettori e di visualizzare funzioni e dati. Proprio grazie a questo software è possibile leggere le matrici contenute nei files NetCDF del WOA2018 e, tramite i dati ottenuti, elaborarne dei grafici e delle figure in modo che tali dati siano più facili da interpretare. I grafici ottenuti tramite MATLAB sono principalmente profili medi di temperatura e salinità lungo la colonna d'acqua, diagrammi T/S, mappe di distribuzione dei dati e grafici a barre riguardanti il numero di dati raccolti e mappe di differenza di temperatura e salinità tra due decenni. L'analisi dei dati è stata eseguita sia sull'intero Mar Mediterraneo che sulla sua parte orientale e occidentale considerando le medie stagionali. Nella seconda fase lo studio è stato focalizzato sulle zone di formazione delle masse d'acqua per verificarne la variazione decadale delle caratteristiche di temperatura e salinità. Nel prossimo paragrafo sono mostrate le mappe stagionali per ciascuna decade e le relative mappe di distribuzione dei dati, utili come analisi preliminare del data set.

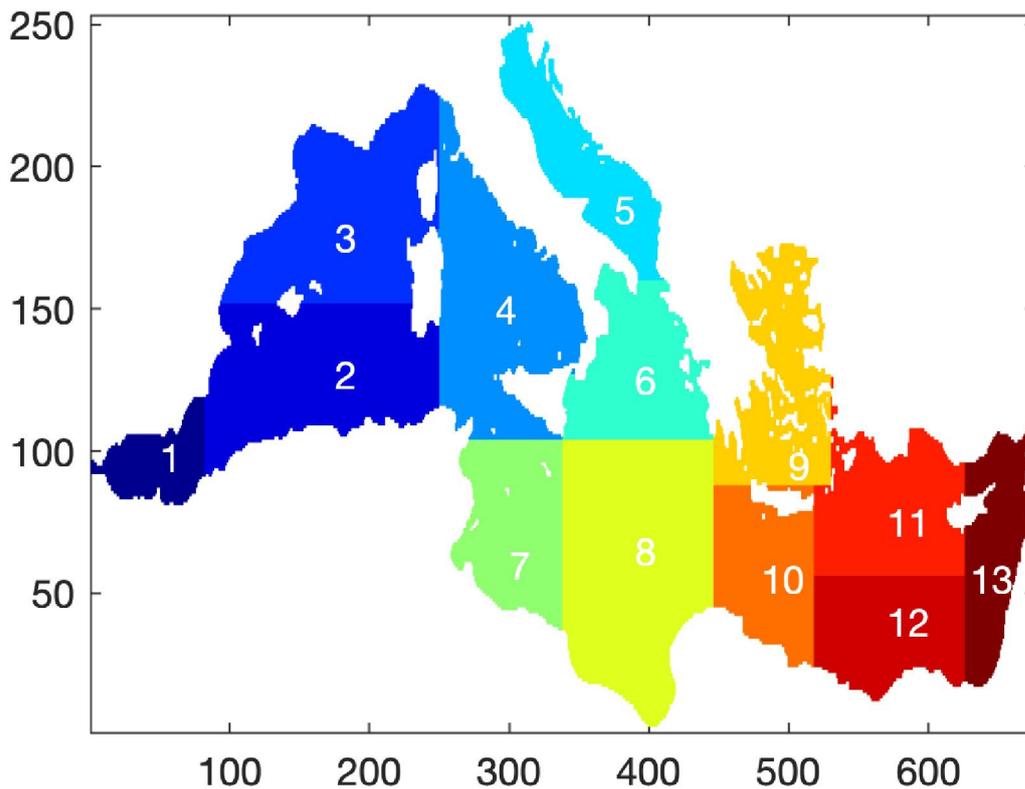


Figura 10: mappa del Mar Mediterraneo suddiviso in regioni

La Figura 10 mostra la suddivisione in regioni del Mar Mediterraneo, basata sulle principali caratteristiche idrodinamiche del bacino. Tale regionalizzazione è stata applicata per studiare le caratteristiche termoaline in 4 regioni specifiche. I grafici che saranno presentati nel capitolo 3 sono stati elaborati suddividendo inizialmente il Mar Mediterraneo Occidentale, che comprende le regioni dal numero 1 alla 7 escluse le regioni 5 e 6, e il Mar Mediterraneo Orientale, che sono le regioni dal numero 8 al numero 13 comprese le regioni 5 e 6. Inoltre sono stati analizzati i dati delle singole regioni dove sono stati riscontrati eventi di formazione di masse d'acqua, queste sono: la regione 3 che rappresenta il Golfo del Leone, la regione 6 per il Mare Ionio, la regione 10 per il Mare di Creta e la regione 11 per il Mar Levantino.

2.3 Mappe di temperatura e salinità e distribuzione dei dati del Mediterraneo

Le seguenti figure mostrano le mappe dell'andamento medio della temperatura e della salinità nel Mar Mediterraneo. Le mappe sono suddivise nelle quattro stagioni e per i sei decenni presi in considerazione. Inoltre le immagini sono suddivise per tre differenti livelli di profondità: a 0m, a 300m e a 1000m. per ognuna di queste mappe è stata rappresentata la distribuzione del numero di campionamento dei dati. Questo è utile per capire quanto possano essere affidabili i valori riportati sulle mappe.

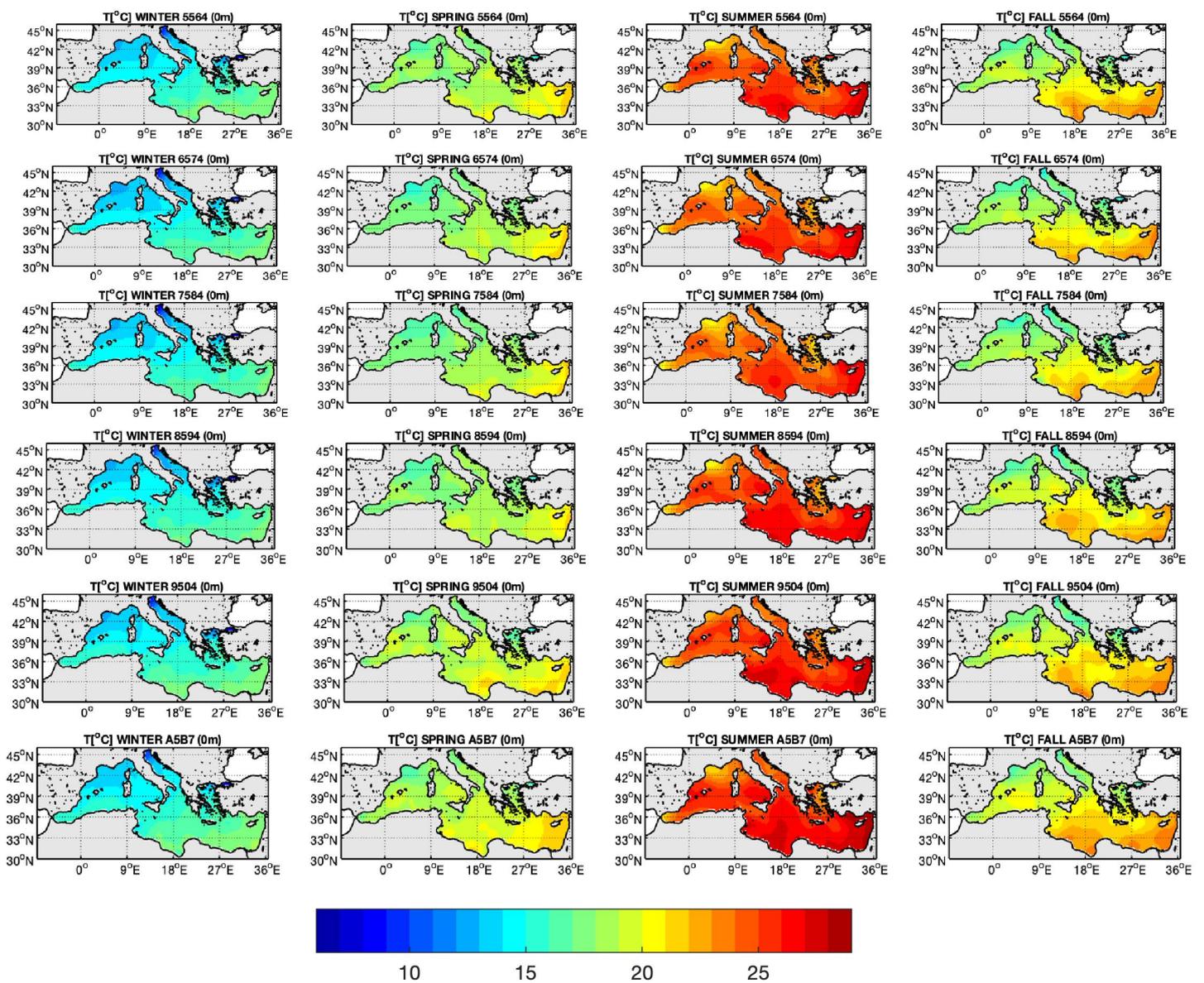


Figura 11: mappe relative alle variazioni di temperatura a 0m, ordinate per stagioni e per decenni in ordine cronologico (dall'alto verso il basso)

Dalle mappe in Figura 11 si può notare che l'inverno presenta un intervallo di temperatura compreso tra i 5 e i 18°C, mentre in estate i valori si riscontrano tra i 15 e i 30°C. In primavera e in autunno invece la temperatura dell'acqua oscilla tra i 15 e i 25°C. Nel periodo invernale si può notare inizialmente una diminuzione di temperatura di un grado nel Golfo del Leone tra il decennio 1955-1964 e il 1965-1974. Nei decenni seguenti invece si osserva un graduale aumento della temperatura che passa da 13°C nel 75-84 a 14°C nel 05-17. Questa diminuzione di temperatura avvenuta nel decennio 65-74 è presente anche nelle altre stagioni, ma non avviene esattamente nella regione del Golfo del Leone bensì un po' più a sud nella parte centrale del Mar Mediterraneo Occidentale e in periodi di tempo differenti. In primavera avviene una diminuzione di temperatura da 17°C a 16°C durante i decenni 65-74 e 75-84, in estate invece la diminuzione è presente principalmente nel 75-84 passando da 24-25°C a 23-24°C. In autunno la temperatura nel Mediterraneo occidentale mostra un progressivo aumento di un grado durante i decenni soprattutto nella zona meridionale, arrivando nel 05-17 a una temperatura di 20°C. Anche la parte sud-est del Mar Mediterraneo Orientale mostra una diminuzione in inverno di un grado circa nei primi decenni fino al 75-84, che è visibile nelle mappe tramite il cambiamento di colorazione da un verde acceso (18°C) a un verde acqua (17°C), per poi ritornare a un aumento di temperature nei decenni seguenti. Questa variazione di un grado nel 75-84 è presente in tutte e quattro le stagioni: in primavera passando da 21°C a 20°C, in estate passando da 28°C a 27°C e in autunno passando da 23°C a 22°C. Nei decenni seguenti al 1975-1984 le temperature crescono nuovamente ritornando alle condizioni presenti nel decennio 55-64. In estate le temperature nella parte sud-est del Mediterraneo e in prossimità delle coste della Tunisia raggiungono addirittura 29°C.

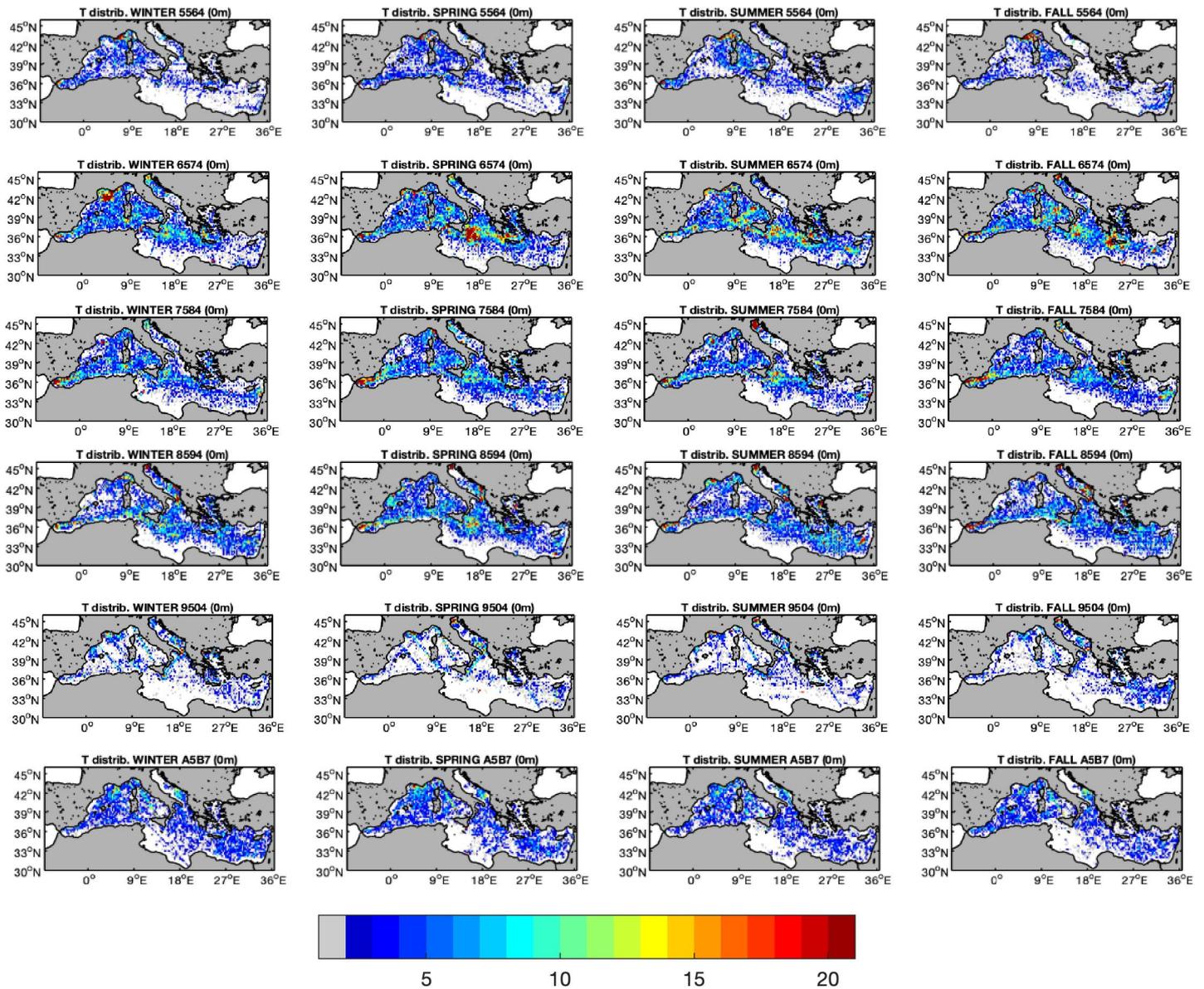


Figura 12: Mappe di distribuzione dei dati di temperatura a 0m ordinate per stagione e per decenni in ordine cronologico (dall'alto verso il basso)

Le mappe relative alle distribuzioni dei dati sono state colorate di grigio nelle zone in cui è stato prelevato soltanto un dato per comprendere meglio quali siano le zone con scarsa presenza di dati.

Osservando le mappe superficiali di distribuzione dei dati di temperatura (Figura 12) si nota che il maggior numero di dati è presente nel decennio 1965-1974 e nel 1985-1994. Nel decennio 95-04 invece si riscontra la minor presenza di dati, inferiore addirittura al decennio 55-64. Come si può vedere nella parte inferiore di tutte le mappe, soprattutto in prossimità delle coste della Tunisia, non sono presenti dati. Analizzando il periodo invernale dei decenni si nota che nel 55-64 e nel 65-74 sono stati prelevati molti dati nella regione del Golfo del Leone, con

oltre 20 dati relativi alla stessa zona. Lo stesso è avvenuto in prossimità dello Stretto di Gibilterra nel 75-84 e nell' 85-94 dove si può osservare un'abbondante presenza di dati. Nel Mare Adriatico invece la situazione è più variabile. Si può osservare che nel decennio 55-64 sono stati prelevati pochi dati in questa zona, soltanto nel periodo estivo sono presenti 2-3 dati per punto. Nel decennio 05-17 addirittura non si riscontra la presenza di dati. La maggiore distribuzione di dati nel Mare Adriatico è avvenuta nel 65-74 con un numero di campioni variabile tra i 2 e i 15 dati per punto e con un picco del numero di dati che supera i 20 nella parte Settentrionale del Mare nel periodo autunnale. I decenni 65-74 e 75-84 mostrano più o meno la stessa distribuzione di dati nell'Adriatico, ma a differenza del decennio precedente il 75-84 presenta un maggior numero di questi in estate localizzato nella parte Nord. Come per il golfo del Leone il periodo 85-94 conta un grande numero di dati, maggiore di 20, nella zona a nord dell'Adriatico. Diversa la questione nella parte centrale che non mostra campionamenti in primavera e in estate. Infine il decennio 95-04 non riscontra una grande distribuzione dei dati nel Mare Adriatico che sono per lo più localizzati nella regione settentrionale, superando anche qui i 20 dati per punto in tutte e quattro le stagioni. Osservando le mappe si nota che anche nella regione del Mar Mediterraneo orientale in prossimità delle coste della Sicilia sono stati prelevati molti dati, soprattutto in modo più diffuso. Il periodo che conta il maggior numero di campionamenti in questa zona è la primavera del 65-74. Anche i decenni 75-84 e 85-94, sebbene non presentino un elevato numero di dati per griglia come per il 65-74, hanno comunque un numero consistente di campioni. In generale si può dire che il numero di dati distribuiti nelle varie mappe varia tra 1 e 5 per griglia, con qualche eccezione per alcuni luoghi.

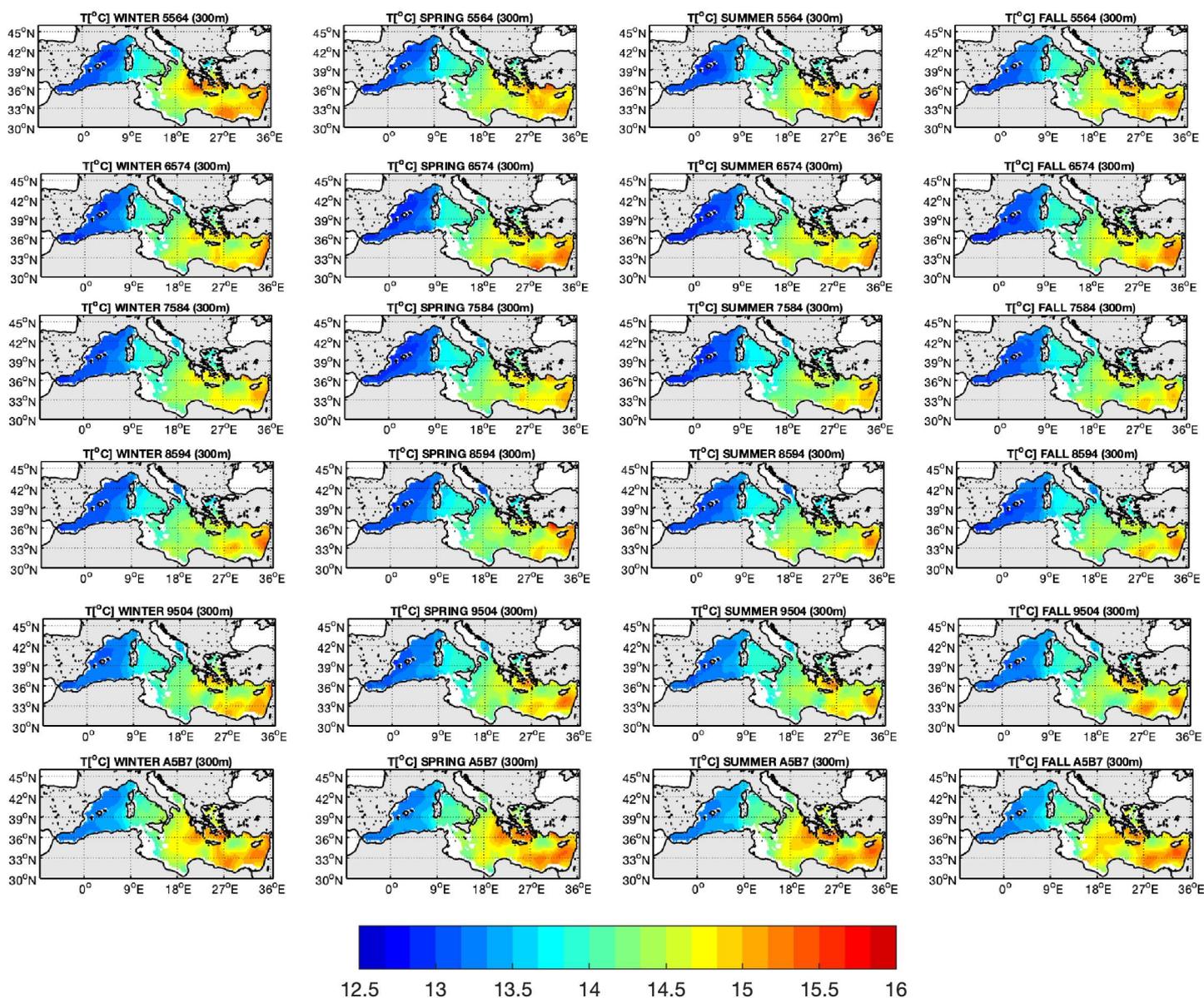


Figura 13: mappe relative alle variazioni di temperatura a 300m, ordinate per stagioni e per decenni in ordine cronologico (dall'alto verso il basso)

La temperatura a 300m di profondità mostra una netta differenza tra il Mar Mediterraneo Occidentale e Orientale. Quest'ultimo infatti risulta essere più caldo rispetto alla parte ovest, rilevando una temperatura media tra 12,5 e 14°C contro i 14-16°C della parte Occidentale. I campi di temperatura relativi al periodo 1955-1964 non sono attendibili a causa della scarsità di dati (Figura 14). Le mappe sono ottenute grazie al software che utilizza medie totali per poter inserire i dati laddove questi siano mancanti. Osservando il Mar Mediterraneo occidentale negli altri decenni, si può vedere un aumento graduale della temperatura da 12.5-13.5°C nel 65-74 a 13-14°C nel 05-17. Nel Mare Adriatico Meridionale si nota invece una diminuzione di

temperatura da 13.6°C a 13°C tra il 65-74 e l'85-94, variazione presente in tutte le stagioni. In seguito la temperatura è tornata a salire fino a 13,6°C nel 05-17. Questo potrebbe essere associato alla Northern Ionian Reversal descritta in precedenza. Anche nel Mediterraneo Orientale, in particolare nel bacino Levantino, si osservano variazioni di temperatura durante i decenni. Inizialmente la temperatura nel 65-74 si aggira tra i 14 e i 15.5°C con picchi di 15.4-15.8°C in estate e in inverno. In seguito nel decennio 75-84 si verifica un calo della temperatura fino a 15°C nelle regioni più calde, soprattutto in prossimità delle coste della Siria e nel Mare di Creta. Nell'85-94 la temperatura risalì di un po' raggiungendo una temperatura media di 15.5°C e rimase più o meno stabile per il decennio successivo. Infine nel 05-17 la temperatura tornò a essere più alta e in maniera più distribuita soprattutto nel Mar Levantino e nel Mare di Creta, con zone in cui si osservano 15.8°C.

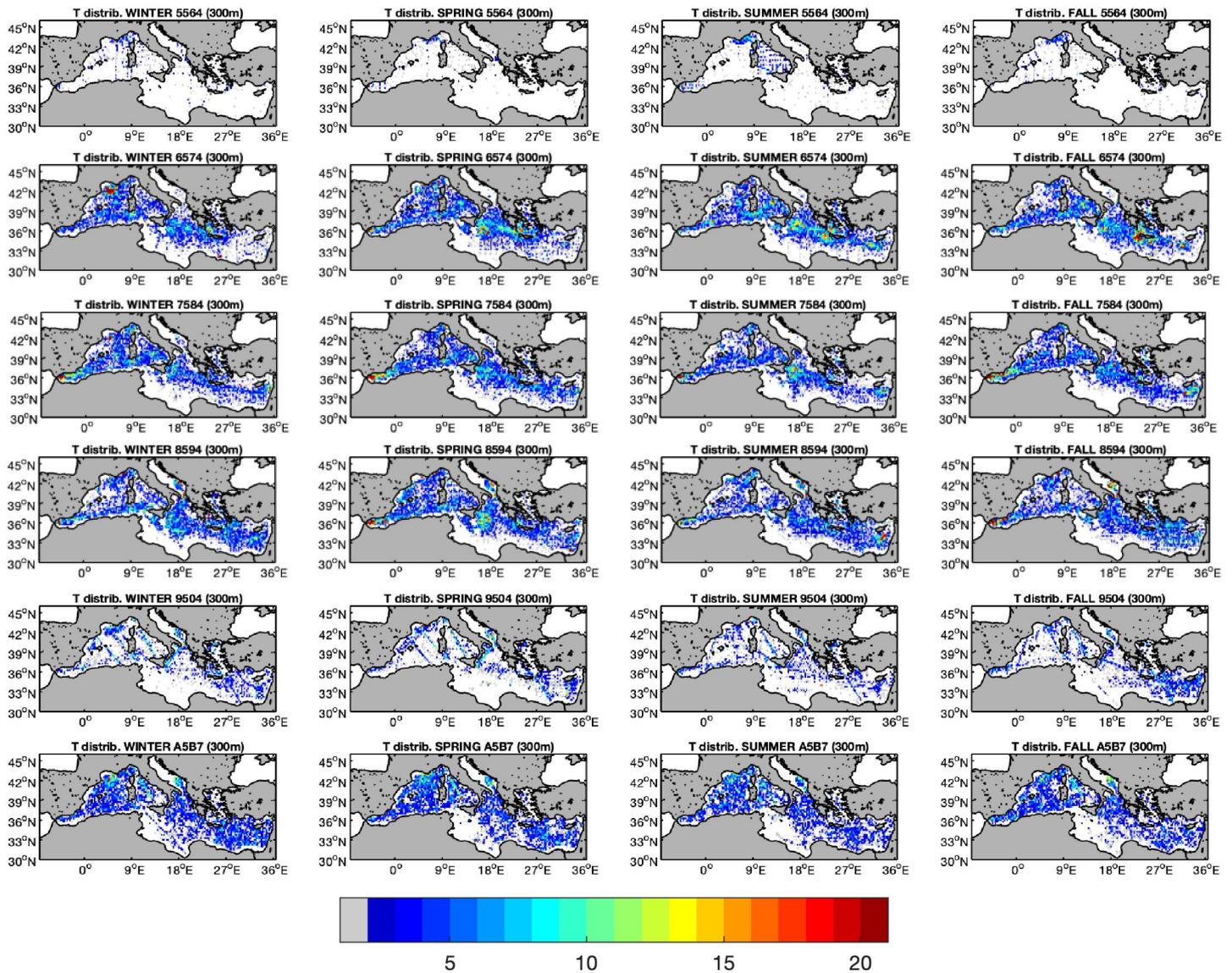


Figura 14: Mappe di distribuzione dei dati di temperatura a 300m ordinate per stagione e per decenni in ordine cronologico (dall'alto verso il basso)

La maggiore distribuzione dei dati di temperatura a 300m (Figura 14) è avvenuta nei decenni 65-74, 75-84 e 85-94. Nel 55-64 invece il numero dati è molto scarso e sono principalmente presenti nel Golfo del Leone e nel Mar Tirreno durante il periodo estivo. Le mappe raffiguranti il periodo 55-64 non mostrano perciò risultati attendibili. Anche il decennio 95-04 non mostra una grande quantità di dati i quali sono principalmente distribuiti nel Bacino Levantino e tra il Mar Ionio e il Mare Adriatico, soprattutto nel periodo autunnale che mostra tra i 2 e i 9 dati per griglia. Come visto in precedenza non sono presenti dati nel Mar Adriatico centro settentrionale. Per l'Adriatico meridionale vi è la presenza di dati soltanto nei periodi dell'85-94, 95-04 e 05-17. Il Golfo del Leone invece mostra una ricca quantità di dati nel periodo invernale del 65-74 con un numero di dati maggiore di 20 per griglia. L'abbondanza di dati in questa regione è

presente anche durante le stagioni del 05-17 osservando una media di 7-9 dati per griglia e una maggiore distribuzione. Nel periodo 65-74 si nota una buona quantità e distribuzione di dati nel Mar Mediterraneo Orientale, soprattutto in prossimità delle coste della Sicilia con una media di 2-10 dati per griglia. Anche il 75-84 risulta essere ricco di dati in questa zona e lo stesso vale per la primavera del 85-94. Nello stretto di Gibilterra si osservano bene o male la presenza di dati in tutti i decenni, ma in particolare nel 75-84, con punti in cui si superano i 20 dati.

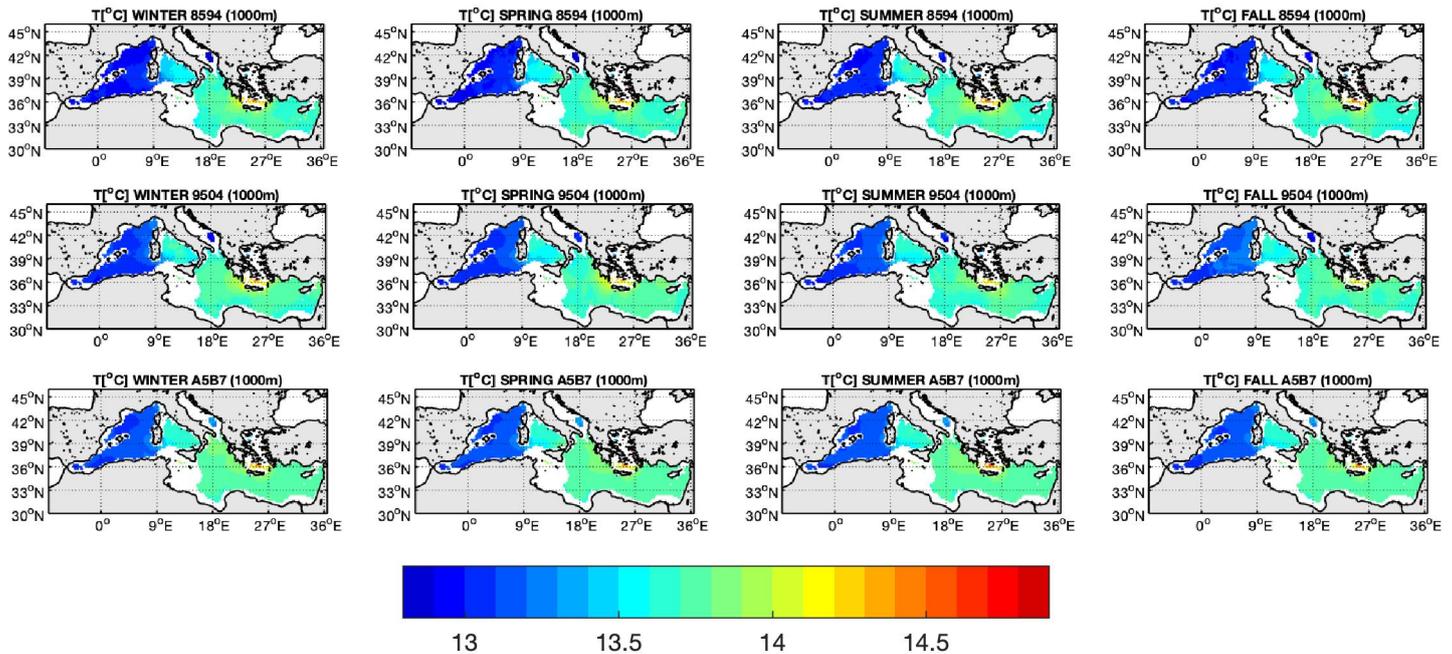


Figura 15: mappe relative alle variazioni di temperatura a 1000m, ordinate per stagioni e per decenni in ordine cronologico (dall'alto verso il basso)

I campi di temperatura a 1000m di profondità sono mostrati in Figura 15 solo per le decadi successive al 85-94 poiché si basano su un numero sufficiente di dati per poter ottenere dei valori attendibili. In Figura 16 si nota ad esempio come anche il decennio 95-04 presenti uno scarso numero di dati per poter essere considerato affidabile. Saranno perciò descritti solo l'ultimo e il terzultimo decennio. Si può osservare che nel Mediterraneo occidentale è avvenuto un lieve aumento di temperatura tra i due decenni passando da 12.8°C a 13 nel 0517. Lo stesso si è verificato nella parte meridionale dell'Adriatico con un aumento da 12.8°C nel 85-94 a 13.4°C nel 05-17. Nel Mediterraneo Orientale invece non sono state riscontrate particolari variazioni, soltanto in qualche regione si possono osservare variazioni da 13.5°C a 13.7°C nel 05-17. Si osserva che nel periodo invernale dell'85-94 vi è un maggior numero di dati nella zona del Golfo del Leone che mostra tra i 2 e gli 8 dati per griglia. Diversa la situazione nelle altre stagioni che mostrano una distribuzione e un numero di dati tra 1 e 2. Nella parte Orientale del Mediterraneo si osserva una maggiore distribuzione nell'85-94, soprattutto in estate e in

autunno. Nel decennio 05-17 la distribuzione dei dati è più omogenea e hanno una media di 2-3 per griglia.

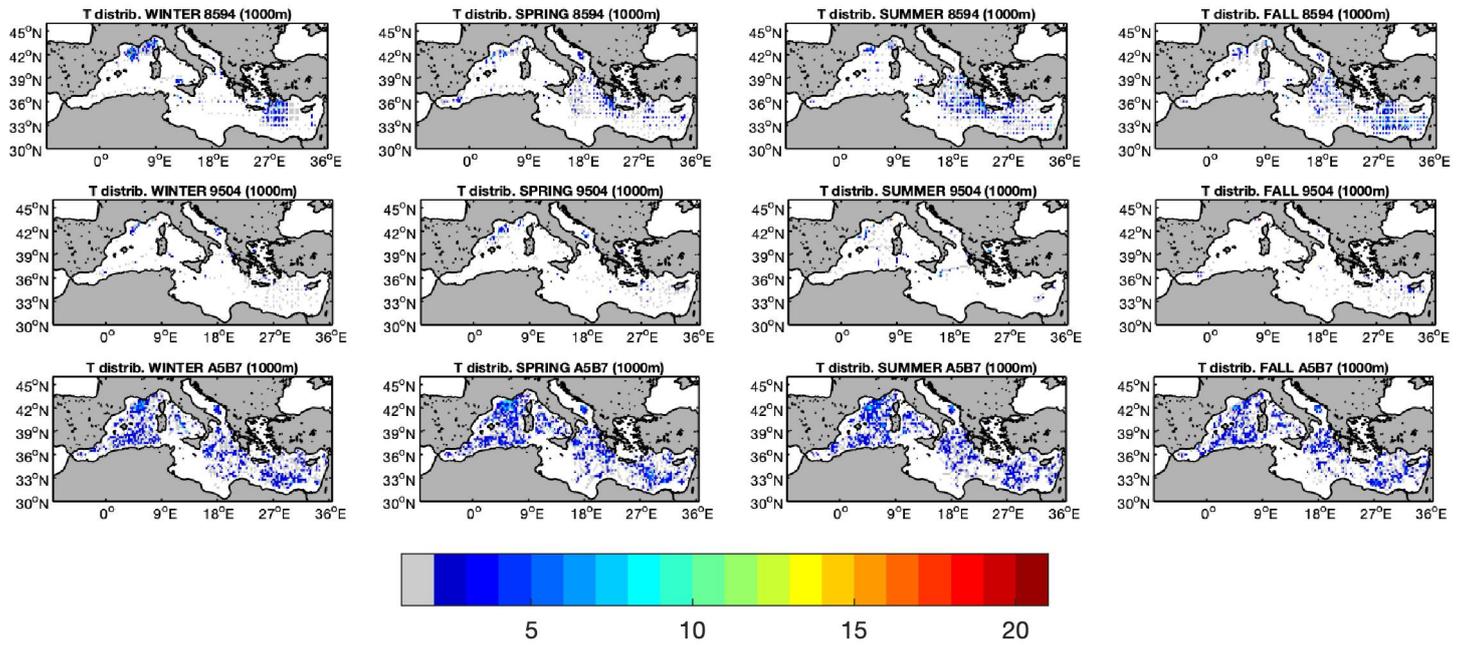


Figura 16: Mappe di distribuzione dei dati di temperatura a 1000m ordinate per stagione e per decenni in ordine cronologico (dall'alto verso il basso)

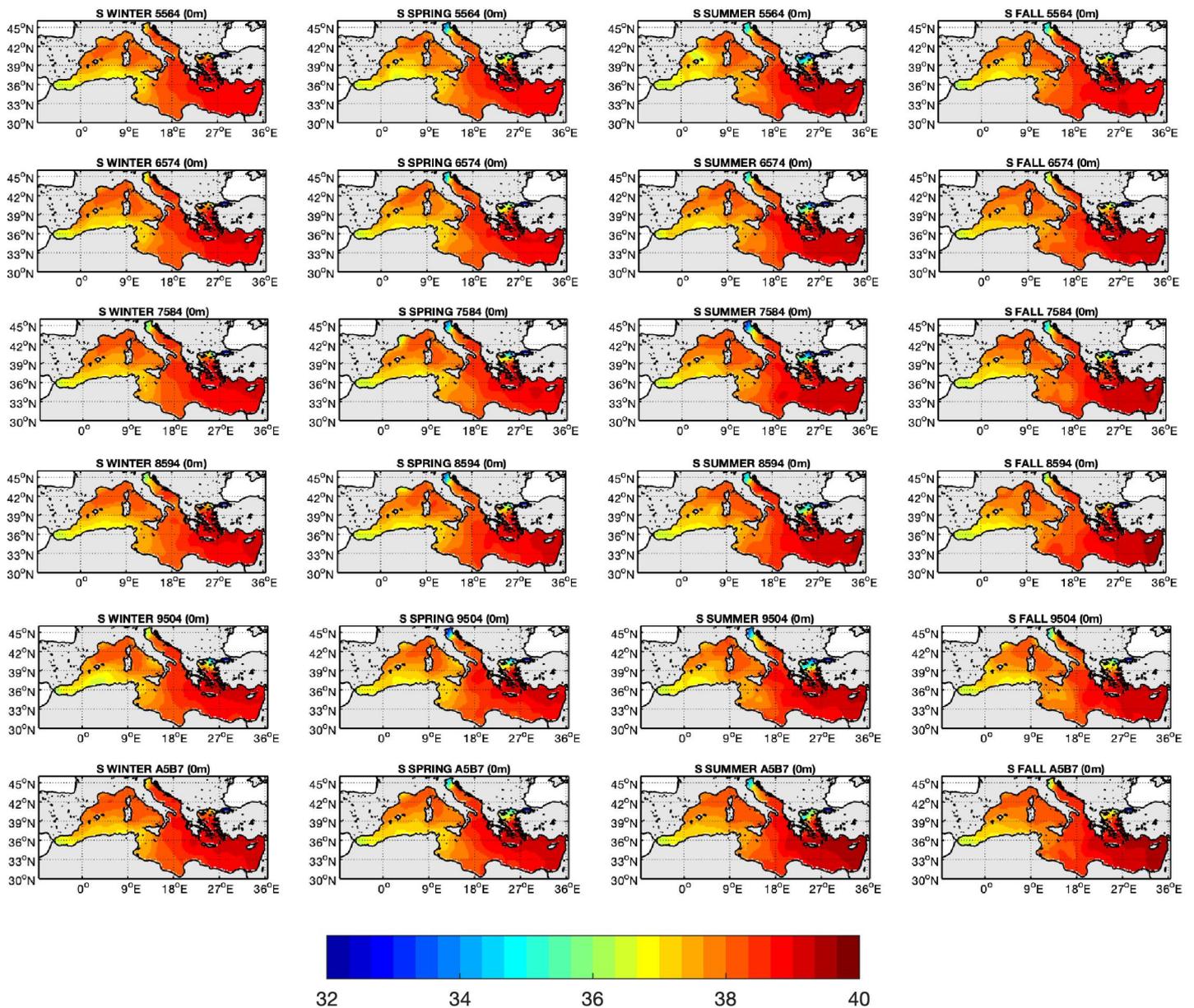


Figura 17: mappe relative alle variazioni di salinità a 0m, ordinate per stagioni e per decenni in ordine cronologico (dall'alto verso il basso)

In Figura 17 sono rappresentate le mappe riguardanti l'andamento di salinità in superficie. I valori ottenuti non presentano un'unità di misura perché questi sono il risultato della quantità in grammi di sale disciolto in un chilo di acqua. Come visto per altre mappe precedenti non è presente un gran numero di dati nei decenni 55-64 (Figura 18). Osservando in Mar Mediterraneo Occidentale non si riscontrano particolari variazioni della salinità, l'unica eccezione si osserva nel Golfo del Leone dove si nota una diminuzione dei valori che tra il 65-74 e il 75-84 scende da 37.5 a 36 per poi tornare a salire a 37 nel 05-17. Anche nel Mar Mediterraneo Orientale non si notano significative variazioni e la salinità oscilla tra 38.8 e 39.8

tra i decenni e le stagioni. Delle eccezioni si riscontrano nell'autunno dell'85-94 e nell'estate e autunno del 05-17 dove in questi casi si riscontra una salinità di 40.

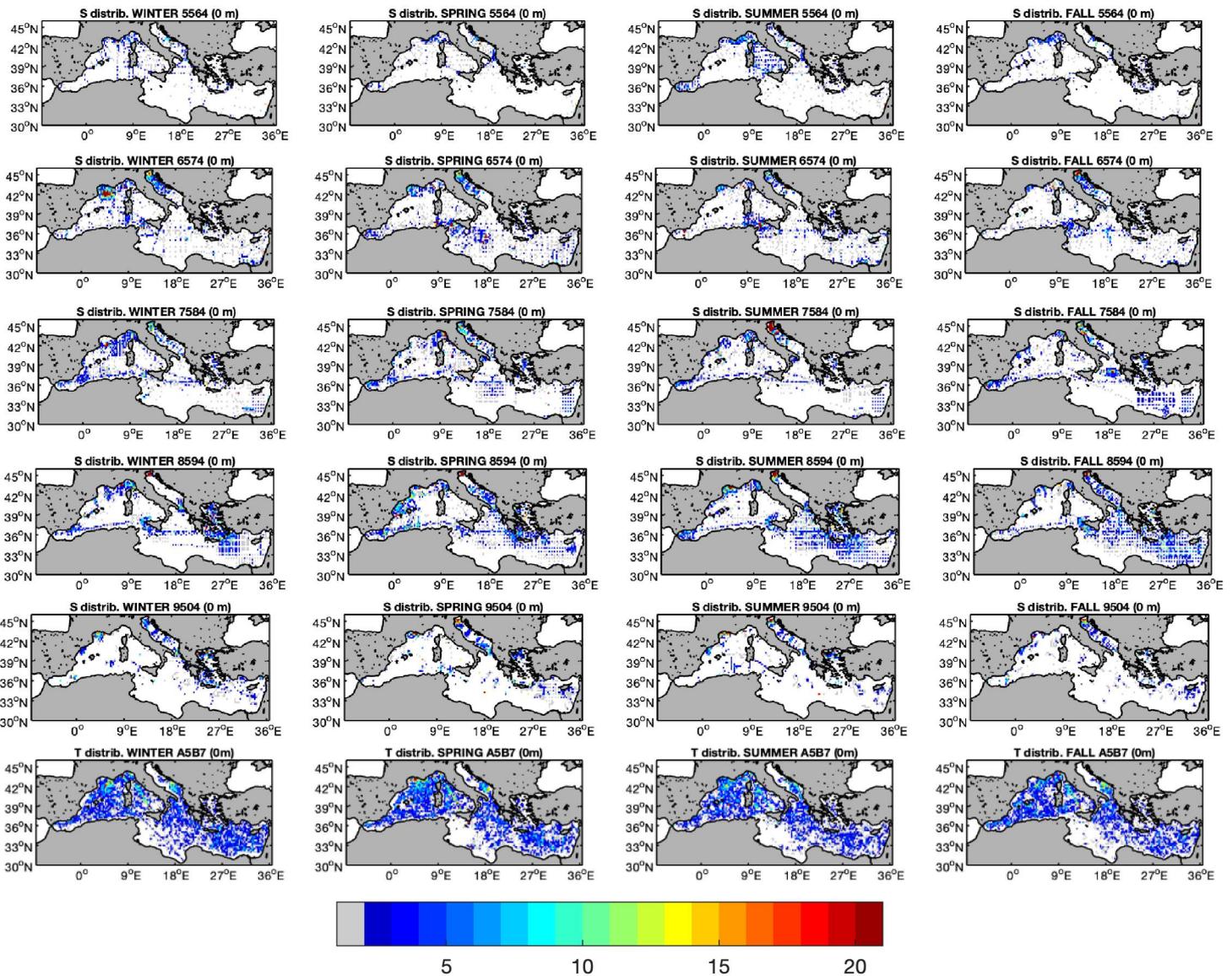


Figura 18: Mappe di distribuzione dei dati di salinità a 0m ordinate per stagione e per decenni in ordine cronologico (dall'alto verso il basso)

Come si può osservare dalle mappe di distribuzione in Figura 18, il numero di dati di salinità sono spesso inferiori al numero di dati della temperatura. Il decennio 55-64 risulta povero di dati distribuiti per lo più nel Golfo del Leone, con circa 2-5 dati, nel Tirreno, nel Sud dell'Adriatico e in prossimità dello Stretto di Gibilterra, soprattutto nel periodo estivo dove è presente più di un dato per griglia. La situazione è simile per il periodo 95-04, anch'esso povero di dati e quindi poco affidabile. Il decennio 65-74 presenta più dati rispetto al precedente, soprattutto vi è una maggiore distribuzione nel Mare Adriatico centro-settentrionale. Nella parte

più a Nord di questa regione nell'estate dell'85-94 si arrivano a superare i 20 dati per griglia. Nel 05-17 invece non risulta la presenza di dati nell'Adriatico centro-settentrionale che sono invece più numerosi nella parte Meridionale. Il Mediterraneo Orientale mostra una buona quantità di dati nel periodo 85-94 con una media di 2-3 dati per intervallo lat/lon. Nel periodo 05-17 il numero di dati in questa zona aumenta a valori di 2-8 e con una distribuzione più omogenea.

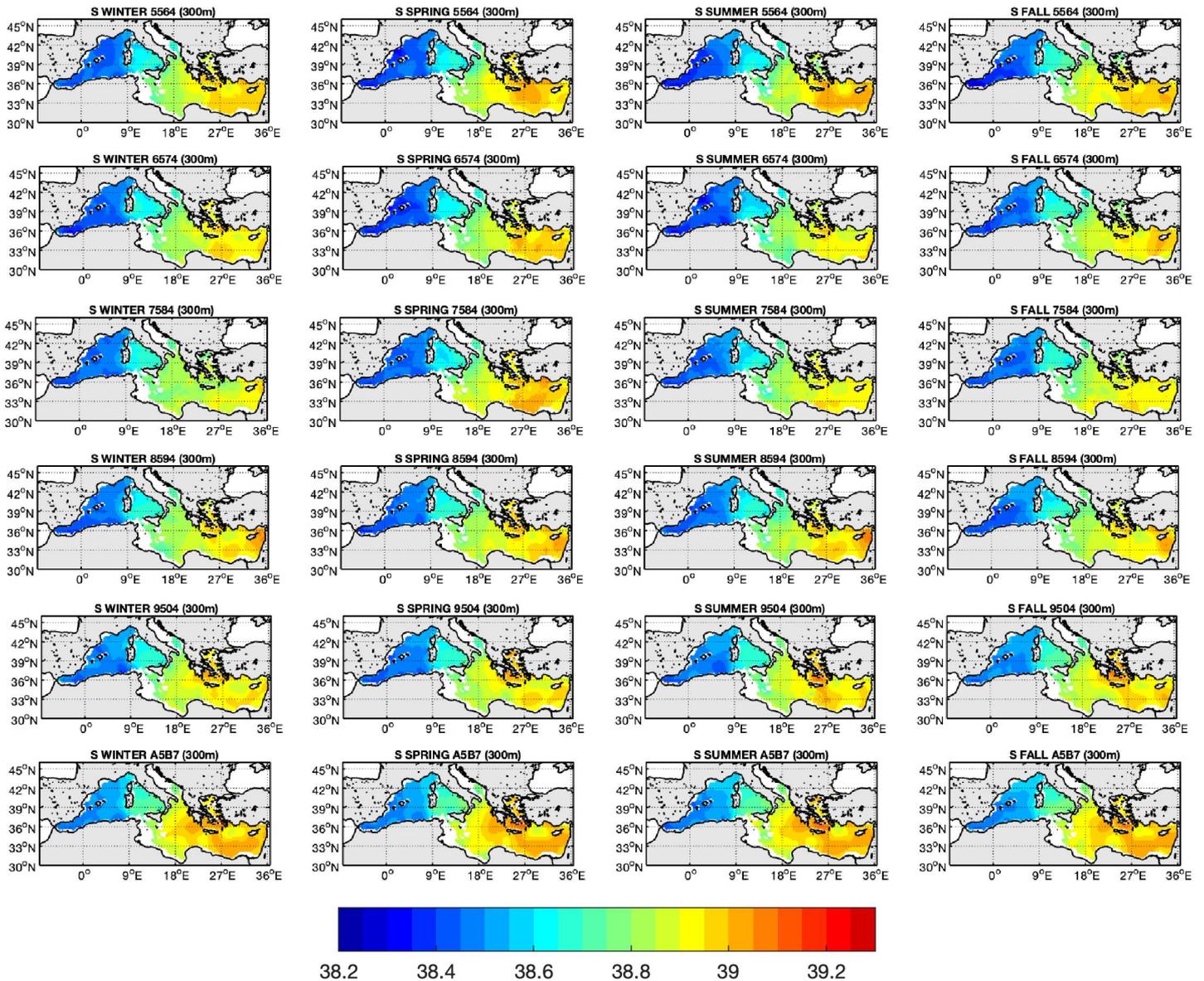


Figura 19: mappe relative alle variazioni di salinità a 300m, ordinate per stagioni e per decenni in ordine cronologico (dall'alto verso il basso)

A 300m di profondità (Figura 19) la salinità si aggira attorno a 38.4-38.6 nel Mediterraneo Occidentale e a 38.9-39.1 nella parte Orientale più salata. Nel Mar Mediterraneo Occidentale si osserva un aumento graduale della salinità, passando da 38.40 nel 55-64 a 38.55 nel 05-17. Anche nel Mar Tirreno si riscontra un aumento progressivo da 38.65 a circa 38.70. Nel Mediterraneo Orientale non sono stati presi in considerazione i dati del periodo 55-64 per la loro scarsità. Figura 20 mostra differenze di salinità variabili per ogni stagione, in inverno è presente una diminuzione della salinità da 38.90-39.00 nel 65-74 a 38.80-38.90 nel 75-84. In seguito nell'85-94 la salinità torna ad aumentare, soprattutto in prossimità delle coste siriane, raggiungendo 39.20. Nel 95-04 si ha una nuova lieve diminuzione che però nel 05-17 torna a misurare come nell'85-94, ma l'aumento di salinità risulta essere più diffuso. Nella primavera 65-74 la salinità nel Mediterraneo Orientale si aggira attorno a 38.90-39.00 e le stesse variazioni si riscontrano nel decennio successivo, ma in maniera più diffusa. Dall'85-94 la salinità diminuisce gradualmente fino al 95-04 con una media di 38.90 e in seguito nel 05-17 torna ai valori presenti nel 65-74 ma anche in questo caso si è diffuso un livello di salinità più alto. Nell'estate del 65-74 e del 75-84 la salinità ha una media di 38.8-39. Il decennio seguente mostra un aumento dei valori fino a 39.10 soprattutto in prossimità delle coste della Siria e di Creta. Il 95-04 dimostra che vicino alle coste siriane la salinità è diminuita, mentre vicino alle coste di Creta si è verificato un ulteriore aumento fino a 39.20. Nel decennio 05-17 si riscontra una salinità media diffusa di circa 39. Infine in autunno la salinità diminuisce da 39.1 nel 65-74 a 38.9 nel 75-84 per poi ritornare ai valori iniziali nell'85-94. Successivamente la salinità aumenta in maniera diffusa, rilevando una media di 39.10 su quasi tutto il Mediterraneo Orientale.

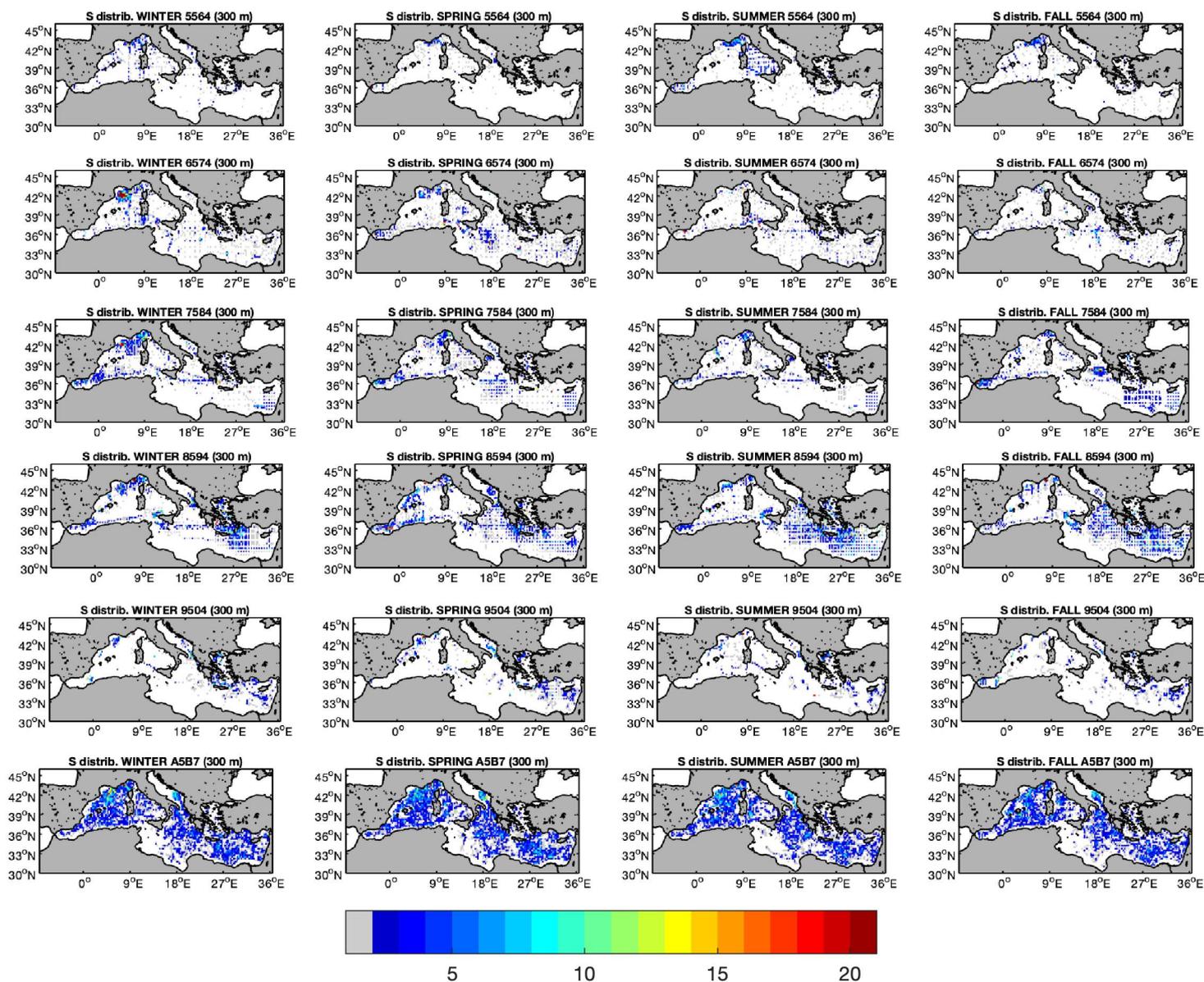


Figura 20: Mappe di distribuzione dei dati di salinità a 300m ordinate per stagione e per decenni in ordine cronologico (dall'alto verso il basso)

Le mappe relative al numero di dati a 300m risultano povere di misure, soprattutto nei decenni 55-64 e 95-04 che mostrano qualche dato solo nelle regioni del Golfo del Leone e nel Mar Tirreno. Nel 65-74 la distribuzione dei dati aumenta lievemente, soprattutto in inverno nel Golfo del Leone. Nel Mediterraneo Orientale invece non sono presenti molti dati, con spesso solo 1 dato per griglia. In primavera in prossimità delle coste siciliane si riscontrano 2 dati per griglia. Nel periodo 85-94 invece i dati in questa parte del Mediterraneo sono più abbondanti, tra i 2 e i 7 dati per griglia, presenti soprattutto in prossimità delle coste di Creta. Il decennio con il maggior numero di dati e una distribuzione più uniforme è il 05-17, in particolare si nota una buona quantità nell'Adriatico Meridionale raggiungendo una media di 8 dati per griglia.

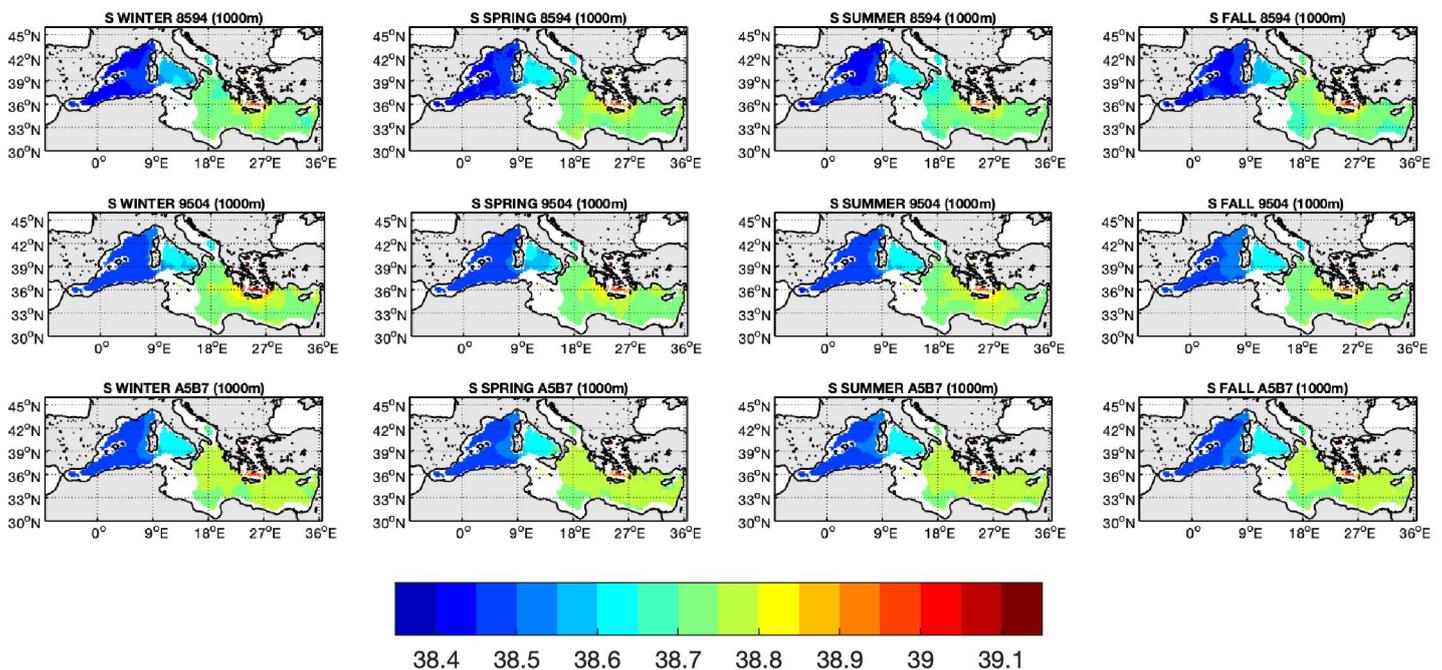


Figura 21: mappe relative alle variazioni di salinità a 1000m, ordinate per stagioni e per decenni in ordine cronologico (dall'alto verso il basso)

Come per la temperatura, anche per la salinità vengono mostrati soltanto i dati successivi al decennio 85-94 (Figura 21). Si osserva che il Mediterraneo occidentale mostra un aumento della salinità, passando da 38.35 nel 85-94 a 38.45 nel 05-17. Lo stesso aumento è presente nel Mar Tirreno che passa da 38.50 a 38.60. anche il Mar Mediterraneo Orientale aumenta di salinità passando da 38.70 a 38.75.

Le mappe di distribuzione della salinità a 1000m mostra che i dati prelevati nel 95-04 non sono sufficienti a ottenere dei valori attendibili della salinità. Il decennio 85-94 presenta una discreta quantità di dati soltanto nella regione del Golfo del Leone in inverno con un numero medio di dati tra 1 e 7 per griglia. Nel Mediterraneo Orientale i dati sono distribuiti in modo più uniforme e si presentano con una media di 1-4 dati per griglia. Nell'ultimo decennio i dati sono presenti in maggiore quantità. Nel Golfo del Leone in alcuni punti il numero di misure raggiunge i 10 dati. Si possono inoltre riscontrare dei dati nella parte inferiore del Mare Adriatico.

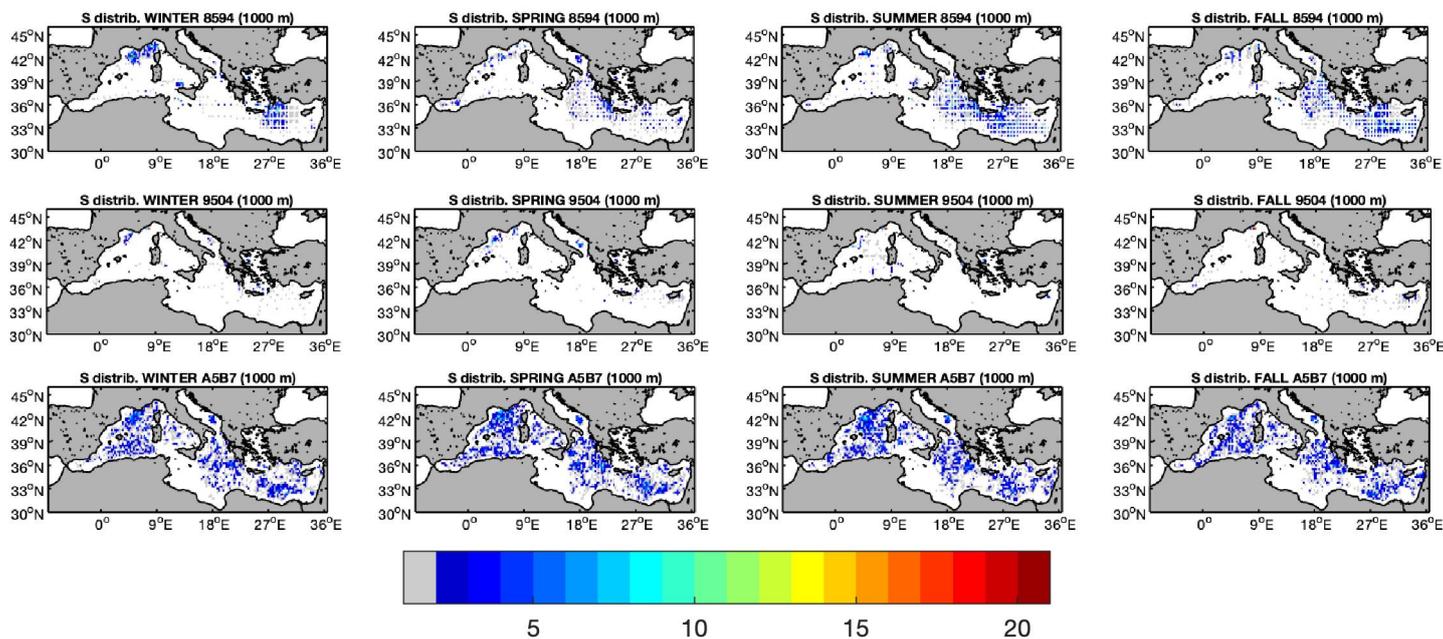


Figura 22: Mappe di distribuzione dei dati di salinità a 1000m ordinate per stagione e per decenni in ordine cronologico (dall'alto verso il basso)

In Figura 23 sono rappresentati istogrammi a barre che mostrano il numero totale di dati prelevati dal Mar Mediterraneo nei vari decenni e nelle diverse stagioni ottenuti alle profondità di 0m, 300m, 600m, 1000m e 2000m. Ogni barra del grafico ha un colore differente in modo da rappresentare i vari decenni. Come si può notare sono presenti un maggior numero di dati di temperatura che di salinità, come evidenziato dalle mappe di distribuzione, inoltre il maggior numero di dati si riscontra in superficie, mentre mano a mano che si cala di profondità questi vanno diminuendo. Ciò potrebbe essere dovuto al fatto che campionare a tali profondità risulta difficile, inoltre non tutte le zone del Mediterraneo raggiungono profondità di 2000m. Il numero massimo di dati di temperatura è presente alla superficie nella primavera 85-94 con 21000 dati. Anche il periodo 65-74 presenta una buona quantità di dati con una media di circa 17000 dati. Il 95-04 invece mostra un basso numero di dati già nella parte superficiale, con una media di 6000-7000 dati. Scendendo più in profondità il numero dei dati, appunto, diminuisce e a 300 e a 600m si può notare che il periodo 55-64 presenta un numero di dati inferiore anche al 95-04, con delle medie rispettivamente di circa 2000 dati a 300m e di circa 500 dati a 600m. Tra i vari decenni il 05-17 ha una diminuzione più graduale del numero di dati man mano che si scende in profondità. A 0m esso presenta circa 6000-8000 dati, a 300 e a 600m ci sono circa 6000-

8000 dati e a 1000m sono 3000-4000. L'ultimo strato, ovvero quello a 2000m, non rileva grandi quantità di dati in nessun decennio, tanto che sono sempre inferiori ai 1000 dati.

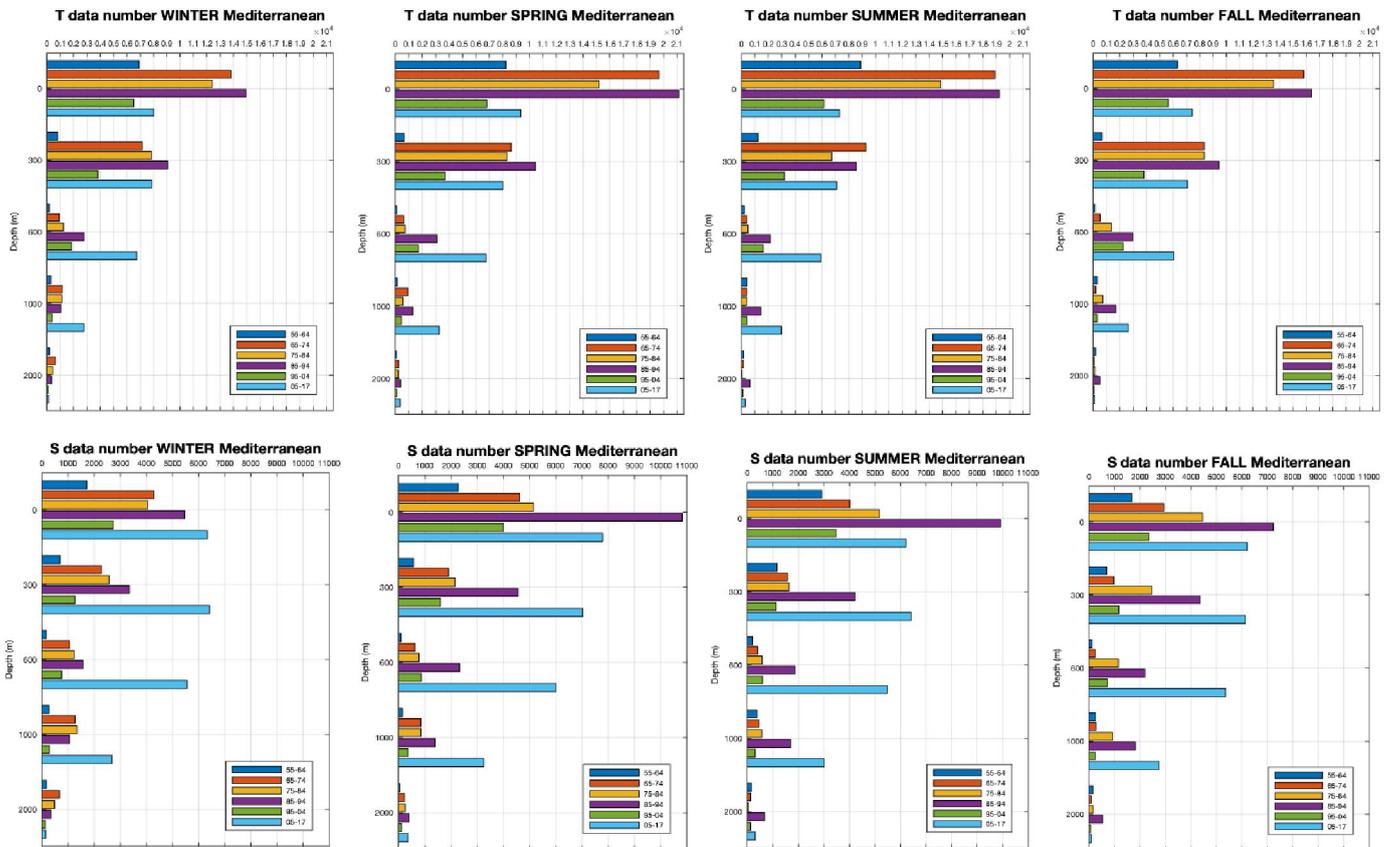


Figura 23: numero di dati totali di temperatura (sopra) e salinità (sotto) prelevati nel Mar Mediterraneo

Anche per la salinità (Figura 23) il maggior numero di dati è presente alla superficie nella primavera del decennio 85-94 con circa 11000. In media le stagioni di questa decade hanno rilevato nella parte superficiale tra i 5500 e gli 11000 dati. Anche in questo caso il decennio con il minor numero di dati è il 95-04 che presenta tra i 1500 e i 2500 dati. A 300m si osserva che il decennio con il maggior numero di dati non è l'85-94, bensì il 05-17 riscontrando una media di 6000-8000 dati. Anche alle profondità di 600 e 1000m il 05-17 mostra una buona quantità di dati. In particolare a 1000m, mentre gli altri decenni presentano un numero inferiore a 2000, il decennio 05-17 ha una media di 3000 dati. Come visto in precedenza per la temperatura, anche la salinità non mostra un gran numero di dati alla profondità di 2000m che risultano essere minori di 500.

CAPITOLO 3

RISULTATI

3.1 Profili di Anomalia nel Mar Mediterraneo

I profili rappresentati nelle seguenti figure mostrano i profili stagionali di anomalia dei vari decenni nel Mediterraneo Occidentale e Orientale. Successivamente saranno analizzati i profili di anomalia delle regioni 3, 6, 10, 11 che sono le zone di formazione delle masse d'acqua. Le anomalie sono state calcolate sottraendo al campo di ciascuna decade il campo medio della temperatura o della salinità relativo all'intero periodo dal 1955 al 2017, rappresentato da una linea rossa pari a zero. I profili di anomalia sono calcolati per ogni livello di profondità da 0m a 3000m e ogni valore mostrato è stato valutato su un numero superiore ai 50 dati, ritenuto affidabile per l'analisi successiva. Per le regioni 3, 6, 10 e 11, il numero minimo di dati utilizzato per calcolare le anomalie è di 10 dati, visto che si tratta di zone più piccole.

3.1.1 Mediterraneo Occidentale

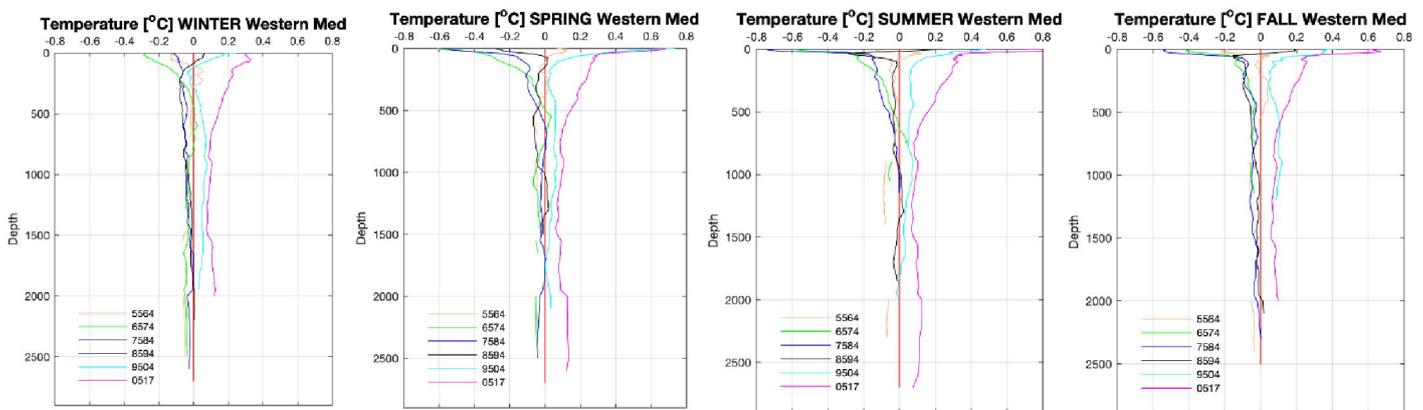


Figura 24: profili verticali dell'anomalia di temperatura nel Mediterraneo Occidentale suddiviso per stagioni

La Figura 24 mostra i profili di anomalia di temperatura nel Mediterraneo Occidentale. Il decennio 05-17 presenta la maggiore anomalia positiva tra tutti i decenni e ciò si nota in tutte e quattro le stagioni risultando dunque il periodo più caldo. In estate in particolare si osserva che in superficie c'è un aumento di quasi 1°C rispetto alle temperature medie. Anche il periodo 95-04 mostra nella parte superficiale un'anomalia positiva, che raggiunge in primavera 0,8°C in più rispetto alla media dell'intero periodo. Si osserva inoltre che in inverno a circa 200m-300m di profondità è presente una lieve anomalia negativa. Le decadi 65-74 e 75-84 mostrano invece

una anomalia tendenzialmente negativa, soprattutto nella parte superficiale. In particolare in estate il decennio 75-84 raggiunge un'anomalia di $-0,7^{\circ}\text{C}$, mentre il decennio 65-74 arriva a $-0,6^{\circ}\text{C}$. I periodi 55-64 e 85-94 tendono più o meno a seguire il profilo zero, tuttavia si nota una particolare variazione nel decennio 84-94 nei primi 300m di profondità. Si può notare che mentre in inverno, in estate e in autunno l'anomalia superficiale è positiva, in primavera questa risulta essere negativa di oltre $0,2^{\circ}\text{C}$. È inoltre interessante osservare che le altre tre stagioni con anomalia positiva, a circa 100-200m mostrano invece un'anomalia negativa, soprattutto in estate e in autunno. Il periodo 55-64 e in alcuni casi anche il periodo 65-74 mostrano in profondità una linea discontinua che si arresta a una certa profondità per poi ricomparire più in basso, come nel caso dell'inverno del 55-64. Questo è dovuto al fatto che un tempo i prelievi dei dati di temperatura e salinità venivano svolti soltanto a profondità specifiche, tralasciando così gran parte della colonna d'acqua.

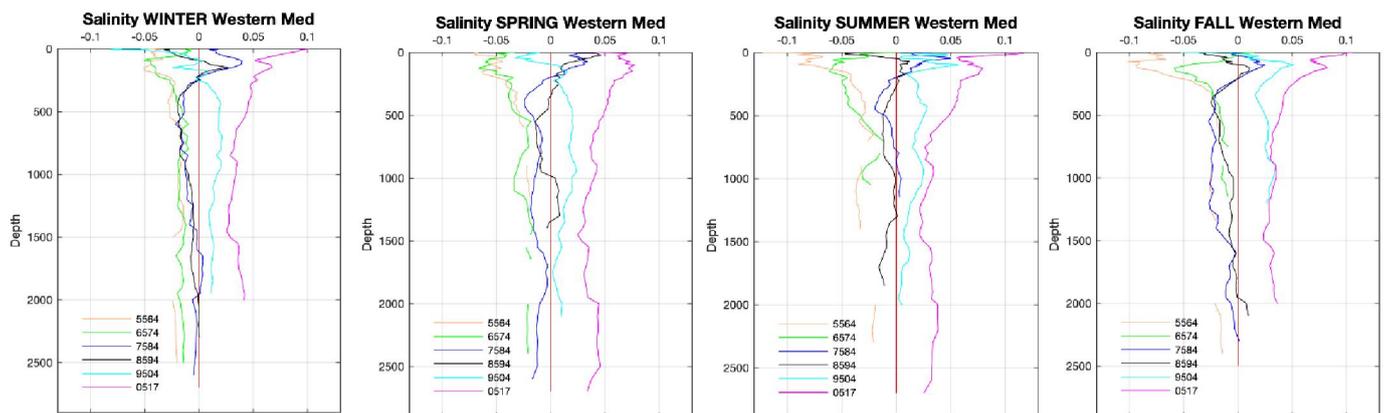


Figura 25: profili verticali dell'anomalia di salinità nel Mediterraneo Occidentale suddiviso per stagioni

Le anomalie di salinità nei profili del Mediterraneo Occidentale (Figura 25) risultano un po' più variabili di quelle di temperatura, soprattutto nei primi 500m di profondità. Anche per la salinità, il decennio 05-17 presenta una forte anomalia positiva lungo tutto il suo profilo e i dati sono presenti fino a oltre i 2500m in primavera ed estate e fino a 2000m in inverno e in autunno. È importante osservare come in tutti i profili si riscontri una brusca variazione a circa 100-300m di profondità. In particolare questo si osserva bene nel periodo autunnale, dove nel 55-64 e nel 65-74 si osserva un'improvvisa diminuzione dell'anomalia negativa mentre per gli altri decenni tale variazione risulta positiva. Questo suggerisce una variazione importante delle caratteristiche delle acque intermedie. La salinità del 85-94 presenta in primavera la stessa variazione positiva dell'anomalia come visto in precedenza per la temperatura. Questo periodo

infatti mostra un'anomalia positiva di quasi 0,05, rispetto alle altre stagioni che invece hanno un'anomalia negativa. I decenni 55-64 e 65-74 sono i periodi che riscontrano i minori livelli di anomalia negativa.

3.1.2 Mediterraneo Orientale

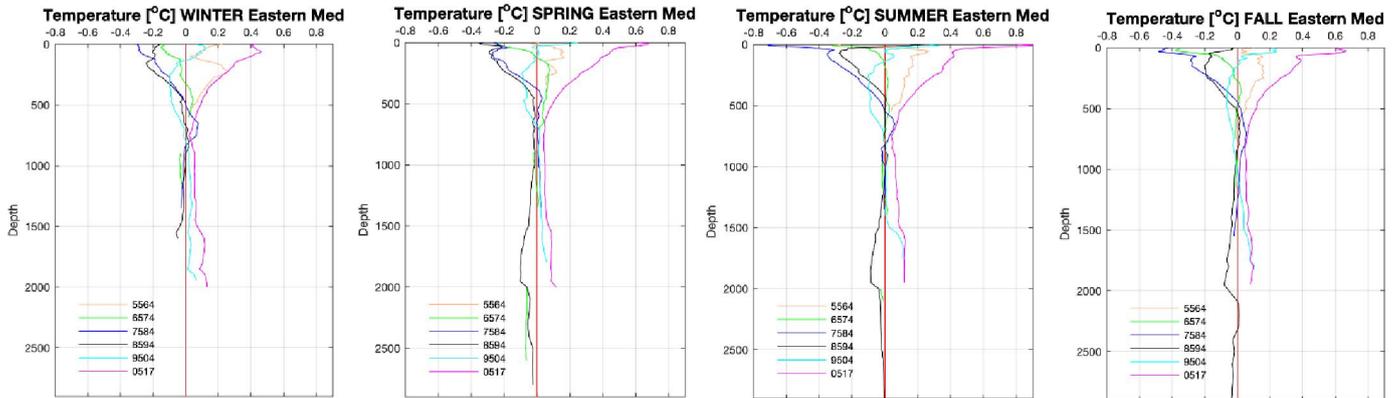


Figura 26: profili verticali dell'anomalia di temperatura nel Mediterraneo Orientale suddiviso per stagioni

In Figura 26 si osservano le variazioni di anomalia nel Mediterraneo Orientale. Come è stato possibile osservare nel Mediterraneo Occidentale, si nota che il periodo 05-17 presenta un'anomalia positiva sia di temperatura che di salinità (vedi Figura 27) in tutte le stagioni, mostrando il suo massimo in estate. Nel 85-94 si osserva una particolare variazione di anomalia che passa da negativa in superficie a positiva al di sotto dei 500m di profondità. Un'altra particolare variazione si riscontra nel periodo 85-94 tra i 1500m e i 2000m di profondità dove si riscontra un'anomalia negativa di circa 0,1°C in primavera, estate e autunno.

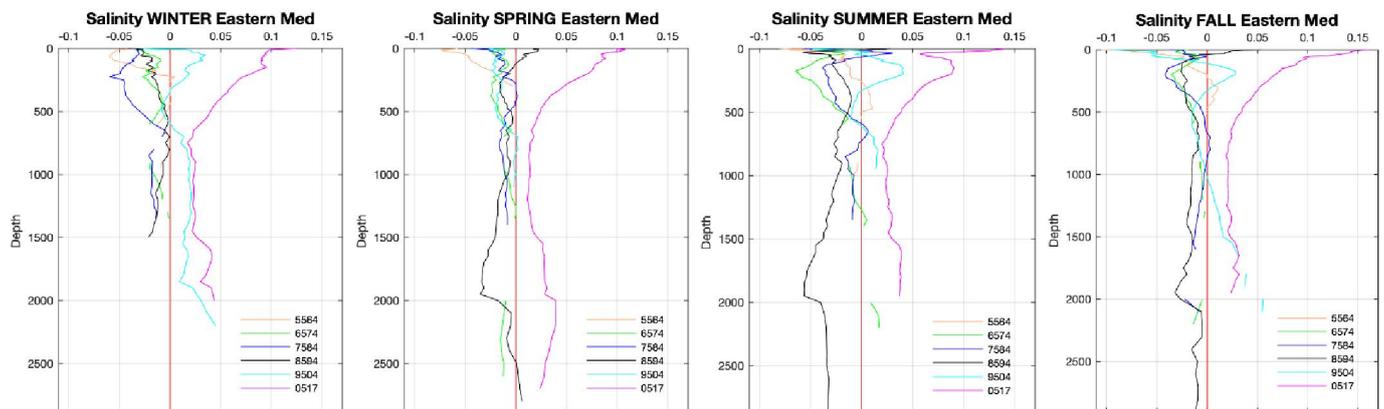


Figura 27: profili verticali dell'anomalia di salinità nel Mediterraneo Orientale suddiviso per stagioni

Le principali variazioni di salinità (Figura 27) si osservano nei primi 500m di profondità. Si nota che il 95-04 presenta un'anomalia positiva a circa 250m nel periodo estivo e autunnale. Anche in inverno si nota questa anomalia, ma essa è presente più superficialmente. Il periodo 75-84 mostra invece alla stessa profondità di circa 250m un'anomalia negativa che in inverno raggiunge $-0,05$. Come è stato possibile vedere nel profilo di anomalia del 85-94 della temperatura, anche la salinità presenta un'anomalia negativa tra 1500-2000m, osservabile in primavera, estate e autunno.

3.3 Differenze tra i decenni 85-94 e 95-04

Di seguito sono mostrate le figure riguardanti le differenze di temperatura e salinità medie tra il decennio 1985/1994 e il decennio 1995/2004 suddiviso per stagioni e per due livelli di profondità: in superficie a 0m e a 300m. Non si mostrano tali figure alla profondità di 1000m a causa della carenza di dati, soprattutto nel decennio 95-04.

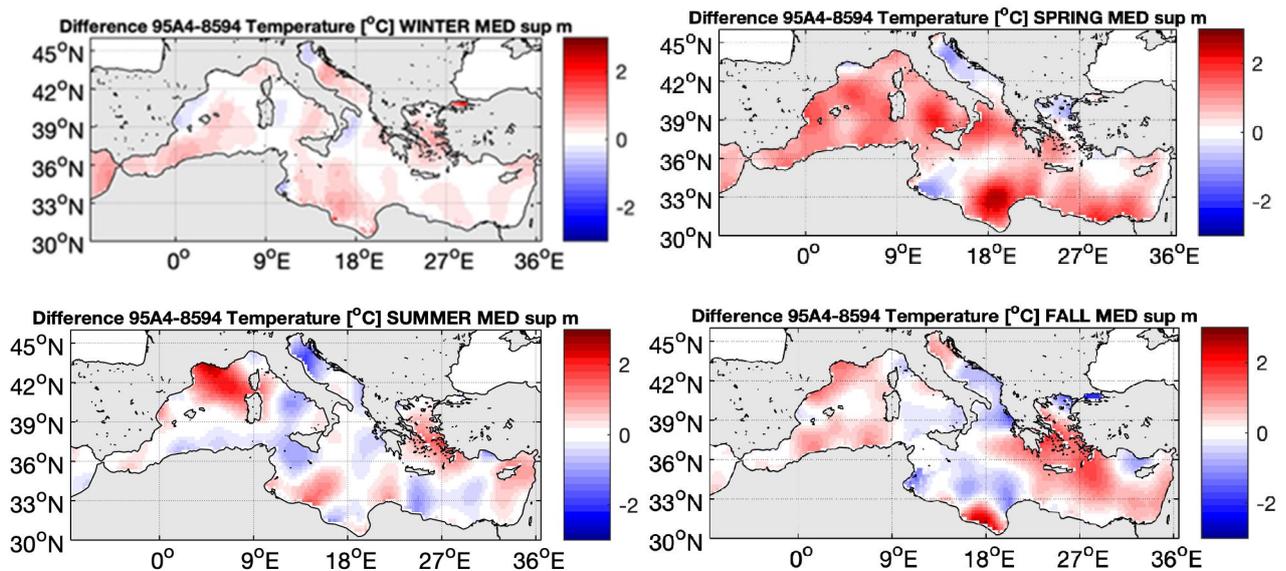


Figura 28: differenza di temperatura tra il decennio 85-94 e il 9504 a 0m

Le variazioni superficiali di temperatura tra i due decenni (Figura 28) mostrano un generale aumento della temperatura in tutto il Mediterraneo principalmente in inverno e in primavera. Nel periodo invernale si osserva un aumento di circa 1°C in prossimità delle coste dell'Algeria, invece vicino alle coste della Spagna, 40°N , si riscontra una diminuzione di temperatura di $-0,6^{\circ}\text{C}$. Una variazione interessante si può osservare nell'Adriatico settentrionale, dove si nota una diminuzione di temperatura rispetto al decennio precedente di $-0,4^{\circ}\text{C}$ in inverno, di $-1,0^{\circ}\text{C}$ in primavera e di circa $-2,0^{\circ}\text{C}$ in estate. In autunno invece si riscontra il fenomeno opposto,

ovvero un aumento di temperatura di $1,2^{\circ}\text{C}$. La regione del mar Ionio settentrionale si presenta più fredda di $-0,6^{\circ}\text{C}$ in inverno e di circa $-1,4^{\circ}\text{C}$ in autunno. In aumento invece in primavera di $2,2^{\circ}\text{C}$, mentre non ci sono variazioni significative in estate. La regione a sud del Mar Egeo risulta essere più calda in tutte le 4 stagioni, con un aumento di temperatura di $0,8^{\circ}\text{C}$ in inverno, di $1,0^{\circ}\text{C}$ in primavera, di $1,8^{\circ}\text{C}$ in estate e in autunno. Proprio in autunno si osserva che la regione è soggetta a un ampio aumento di temperatura. Nel Mar Egeo Settentrionale non si riscontrano particolari variazioni in inverno e in estate, mentre in primavera e in autunno si nota un abbassamento di temperatura rispettivamente di $-1,0^{\circ}\text{C}$ e di $-1,4^{\circ}\text{C}$. Le zone dove si riscontrano grandi variazioni positive sono: il Golfo del Leone in estate con un aumento di $2,8^{\circ}\text{C}$ e, in prossimità delle coste della Libia, dove è presente il Sirte Gyre, con un aumento sempre di $2,8^{\circ}\text{C}$ in primavera e in autunno, anche se meno diffuso. Variazioni negative marcate si osservano in autunno nel mare di Marmara e in estate nell'Adriatico Settentrionale.

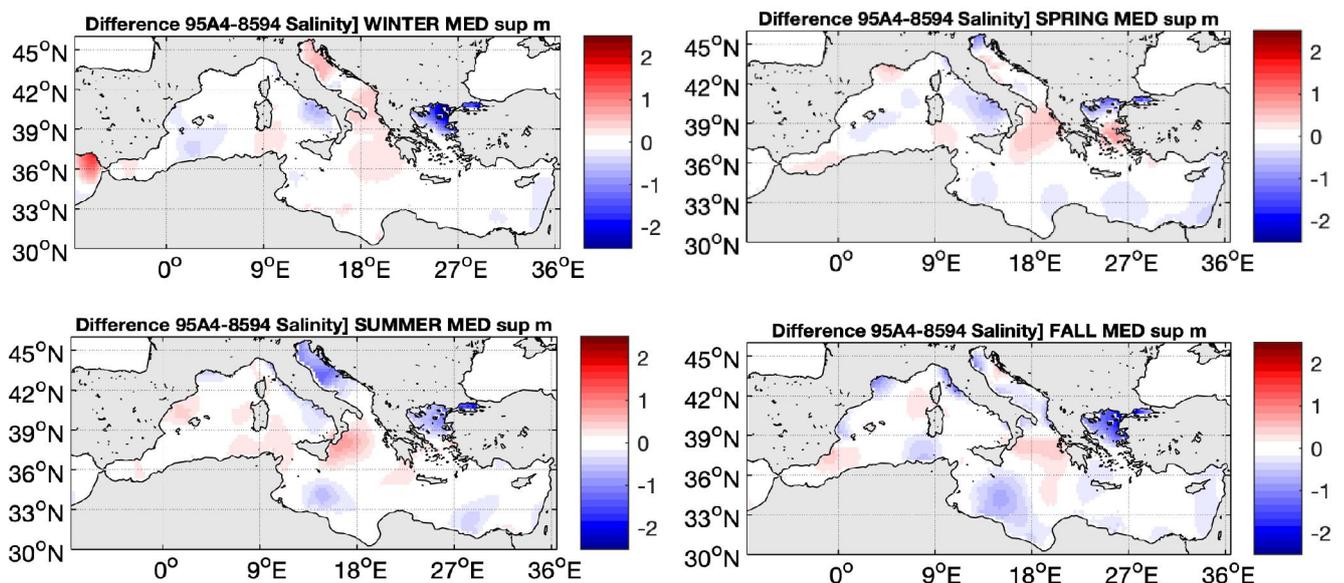


Figura 29: differenza di salinità tra il decennio 85-94 e il 9504 a 0m

Le variazioni superficiali di salinità (Figura 29) mostrano subito un forte aumento di salinità di 2.6 in inverno delle acque Atlantiche in prossimità dello Stretto di Gibilterra. Un altro aumento interessante si osserva nel Mar Ionio Settentrionale con un aumento della salinità di circa 0,32 in inverno, di 0,48 in primavera e in autunno e, in modo marcato, di 0,8 in estate. Variazione negativa è mostrata nel Mar Tirreno, in prossimità delle coste Italiane in cui si nota una diminuzione di temperature in quasi tutte le stagioni a eccezione dell'autunno. Più in specifico la variazione risulta essere di $-0,64$ in inverno, di $-0,80$ in primavera e di $-0,64$ in estate. Si osserva che il Mar Adriatico Settentrionale mostra una differenza variabile tra le stagioni tra i

due decenni: in inverno è presente un aumento di salinità di 0.64, in primavera si notano variazioni positive e negative sporadiche e lo stesso succede in autunno ma in maniera più marcata, in estate invece la variazione risulta fortemente negativa con una diminuzione di -1.32 di salinità. È inoltre interessante osservare che il Mare Egeo mostra una diminuzione di salinità per tutte le quattro stagioni, con una diminuzione di -2 in inverno, di -0.96 in primavera e in estate e di 1.92 in autunno. Altre variazioni di diminuzione della salinità si notano in prossimità delle coste della Libia, a 34°N, in autunno e in estate, con una variazione rispettiva di -0.8 e di -0.6. Anche Mediterraneo Orientale, tra 32 e i 36°N e 35°E, è presente una variazione negativa della salinità di circa -0.32 in tutte le stagioni, sebbene in estate sia molto limitata.

Osservando la Figura 28 e la Figura 29 si nota che le variazioni di temperatura e salinità sono piuttosto incostanti. Questo può essere dovuto all'effetto della variazione delle condizioni atmosferiche e degli apporti fluviali sulle masse d'acqua superficiali oltre a fattori idrodinamici come il Northern Ionian Reversal avvenuto proprio tra la fine degli anni '80 e la metà degli anni '90.

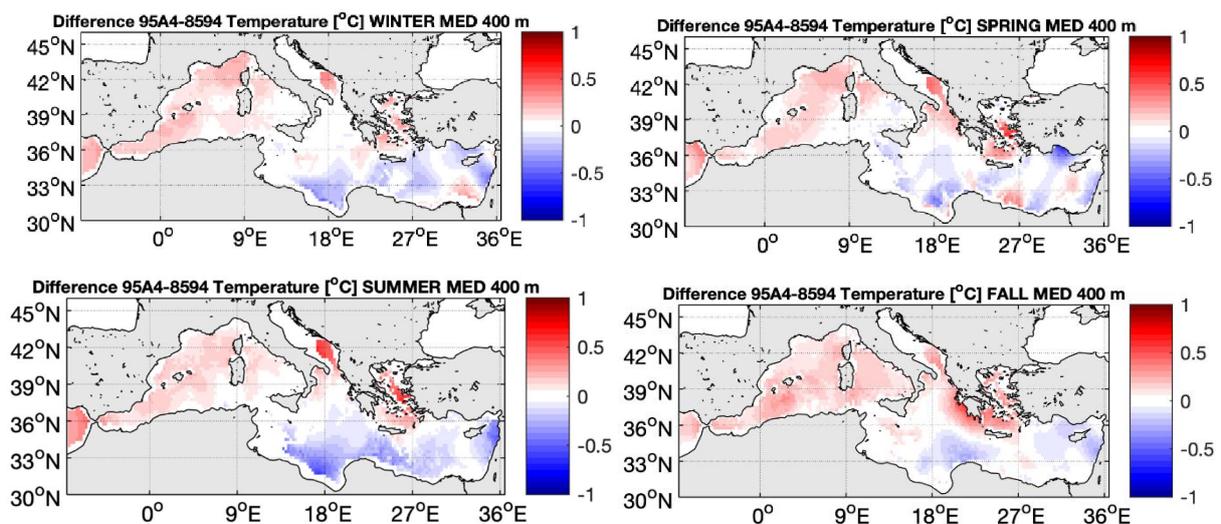


Figura 30: differenza di temperatura tra il decennio 85-94 e il 9504 a 300m

La variazione di temperatura a 300m (Figura 30) mostra per tutte le stagioni una tendenza positiva del Mar Mediterraneo occidentale di 0.25°C, con un aumento più marcato in autunno di 0.37°C. In prossimità delle coste Libiche si osserva invece una diminuzione delle temperature, anche in questo caso in tutte le stagioni. La variazione negativa più evidente si riscontra in estate, con una diminuzione di circa -0.5°C che si propaga verso il bacino Levantino, meno presente tale variazione in primavera. Nell'Adriatico meridionale si nota un

aumento positivo di 0.31°C in inverno, 0.37°C in primavera, 0.62°C in estate e di 0.31°C in autunno. Analoga variazione si riscontra nel mar Egeo con un aumento di 0.25°C in inverno, 0.70°C in primavera, 0.75°C in estate e di 0.31°C in autunno. Proprio nel periodo autunnale si nota questo aumento di temperatura generale dal Mar Adriatico al mar Egeo lungo tutta la costa greca. Nel Mar Levantino è presente una variazione negativa con intensità ed estensione variabile durante le stagioni. La differenza è più marcata in estate, con una variazione di -0.43°C .

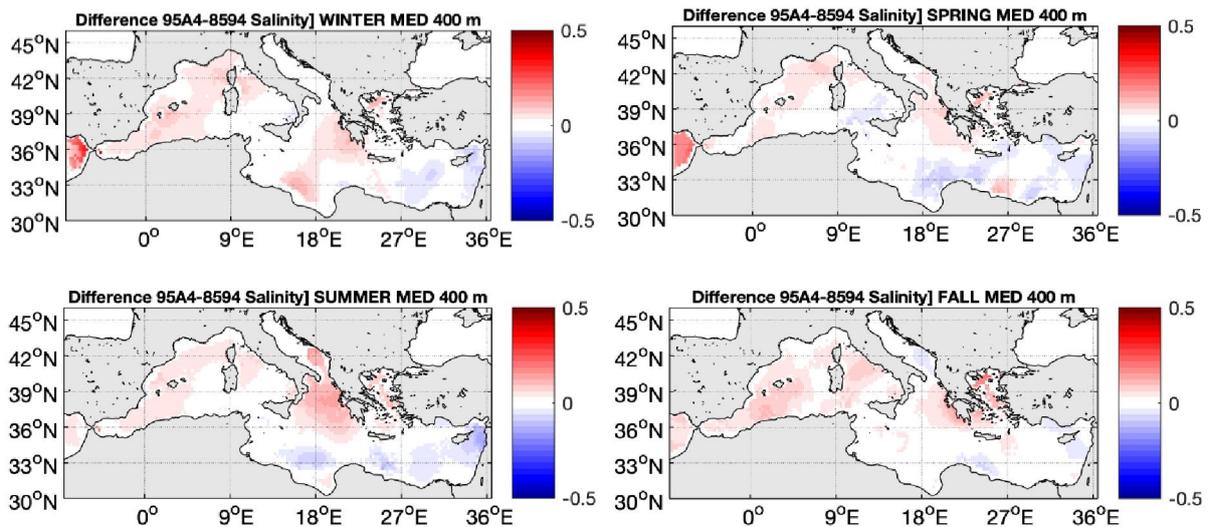


Figura 31: differenza di salinità tra il decennio 85-94 e il 9504 a 300m

Le variazioni di salinità in Figura 31 risultano essere in aumento nel Mediterraneo Occidentale. Soprattutto in inverno e in primavera si riscontra un aumento positivo nell'Oceano Atlantico di circa 0.3. Nella zona a est del Mar Ionio in estate si osserva un'altra differenza positiva di 0.16, variazione che persiste anche nelle altre stagioni ma limitata in prossimità delle coste greche e con un aumento di 0.12 in autunno e in inverno e di 0.09 in primavera. Questa variazione positiva sembra essere diffusa anche nell'Adriatico meridionale nel periodo estivo e primaverile. Si riscontra invece un decremento della temperatura di -0.06 in autunno, sempre nel Mare Adriatico. La variazione di salinità positiva si osserva anche nel Mar Egeo in inverno, primavera e autunno, raggiungendo un aumento di 0.12. Il bacino Levantino presenta invece una diminuzione della temperatura riscontrando in estate la differenza massima di -0.16 . In inverno e in primavera la diminuzione risulta essere di -0.09 , mentre in autunno è di -0.06 .

Analizzando nell'insieme le variazioni di temperatura e salinità tra i due decenni si osserva in linea generale che il Mediterraneo Occidentale tende ad avere un incremento delle due variabili rispetto al decennio precedente. È inoltre interessante osservare che nell'Adriatico meridionale

le masse d'acqua a questa profondità non si propagano oltre una certa latitudine di 42-43°N, verso il Nord Adriatico. Questo è dovuto al dislivello presente tra la piattaforma continentale Adriatica e la piana abissale dello Ionio che non permette l'afflusso delle masse d'acqua intermedie nell'Adriatico settentrionale. Sempre in questa regione si riscontra un aumento di temperatura e di salinità, a eccezione della differenza di salinità presente in autunno nell'Adriatico Meridionale, mentre è presente una diffusa diminuzione di temperatura e salinità nel Mediterraneo orientale fino al bacino Levantino. Le differenze positive e negative riscontrate in queste due zone potrebbero essere correlate alla variazione della corrente AIS avvenuta tra il 1997 e il 2006 che ha trasportato le acque fredde e poco salate Atlantiche verso il bacino Levantino, permettendo così un aumento di temperatura e salinità nello Ionio Settentrionale e nell'Adriatico Meridionale.

3.3 Profili di Anomalia nelle Regioni

I seguenti profili di anomalia si riferiscono alla regione 3 (Golfo del Leone), regione 6 (Ionio settentrionale), regione 10 (Cretan Passage) e regione 11 (Rhode Gyre) si veda Figura 10. Per queste zone le medie dei dati che costituiscono i profili sono mostrate soltanto se presenti un numero di dati pari o superiore a 10.

3.3.1 Golfo Del Leone (Regione 3)

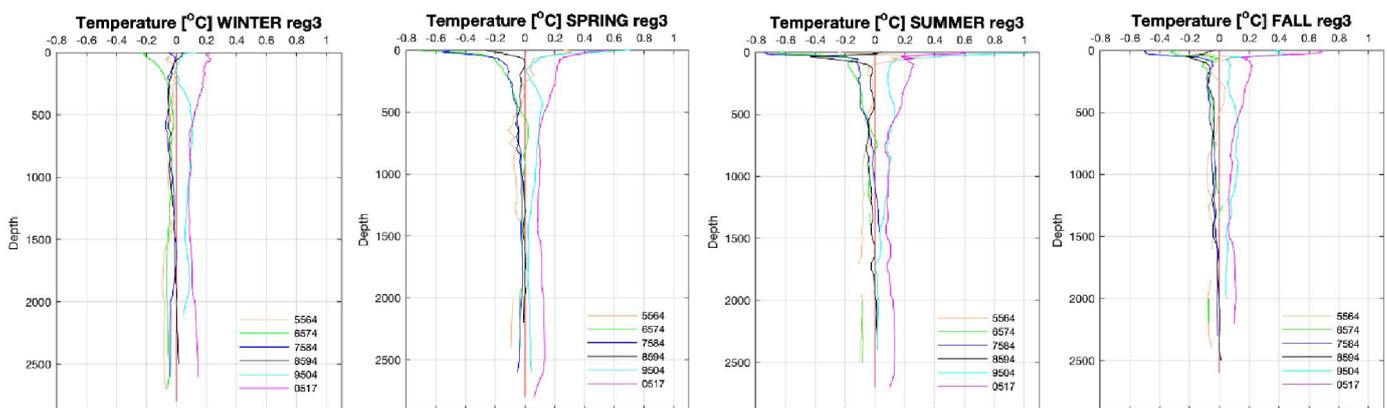


Figura 32: profili verticali dell'anomalia di temperatura nella regione 3 suddiviso per stagioni

I profili di temperatura nel Golfo del Leone, (Figura 32) mostrano particolari differenze nei primi 400m di profondità. I decenni 65-74, 75-84 e 85-94 presentano una piccola anomalia superficiale negativa che si avvicina allo 0 a circa 200m di profondità e permane a maggiori profondità. Per i decenni 95-04 e 05-17 invece l'anomalia è positiva ed è massima in superficie poi tende a diminuire scendendo in profondità. Il periodo 55-64 mostra invece un'anomalia

variabile: in estate e in autunno l'anomalia è negativa in superficie e diventa positiva a circa 100-200m di profondità, in inverno il profilo tende a essere a 0 e in primavera mostra alla superficie un'anomalia positiva. Interessante è anche la variazione negativa che si verifica sempre nel 55-64 tra i 500m e i 1000m nel periodo primaverile.

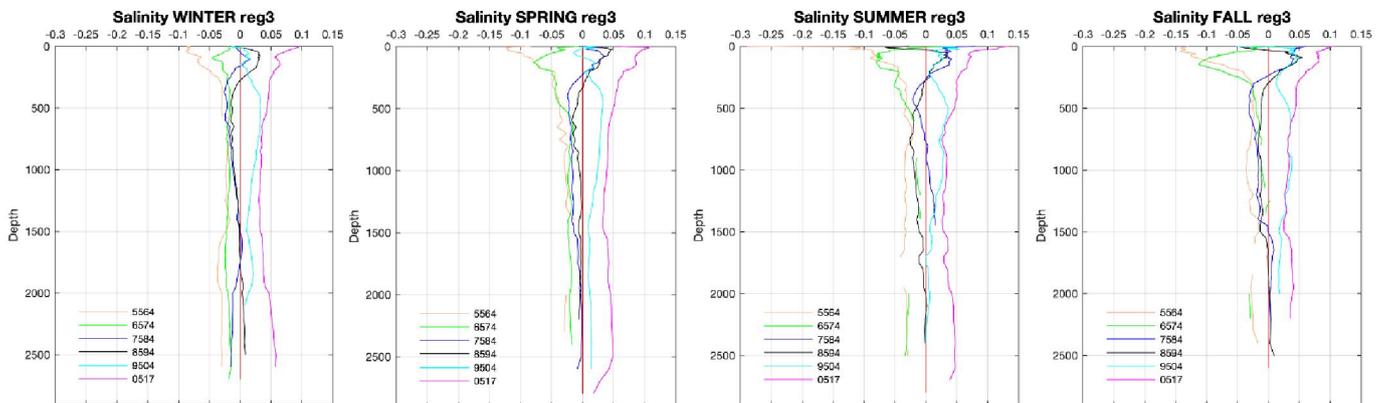


Figura 33: profili verticali dell'anomalia di salinità nella regione 3 suddiviso per stagioni

In Figura 33 i profili della salinità mostrano una particolare anomalia negativa nella parte superficiale del periodo 55-64 in estate in cui la variazione è di circa $-0,3$. Un'altra anomalia negativa è presente a circa 200m nel periodo 65-74 osservata in tutte le stagioni, in cui si arriva in autunno a $-0,1$. Alla stessa profondità invece i profili del 75-84 e 85-94 mostrano un'anomalia positiva ben visibile soprattutto in inverno. Un'altra variazione è visibile tra i 1500m e i 2000m anche in questo caso ben osservabile in inverno dove i decenni 75-84 e 95-04 presentano un'anomalia che aumenta in positivo, mentre il decennio 55-64 ha un'anomalia negativa. Gli altri due decenni, il 65-74 e il 05-17 non presentano variazioni dalla loro tendenza di anomalia.

Osservando sia le anomalie di temperatura che di salinità si può supporre che l'aumento delle anomalie di queste due variabili nel 85-94 a circa 100-300m potrebbero essere associate ad eventi di formazione di masse d'acqua profonde che hanno comportato l'aumento della temperatura e della salinità nello strato intermedio dell'acqua. Questo è visibile anche nel decennio 75-84. Tuttavia è bene considerare la tendenza degli ultimi due decenni ad avere livelli di temperatura e salinità più alti in generale.

3.3.2 Ionio Settentrionale (Regione 6)

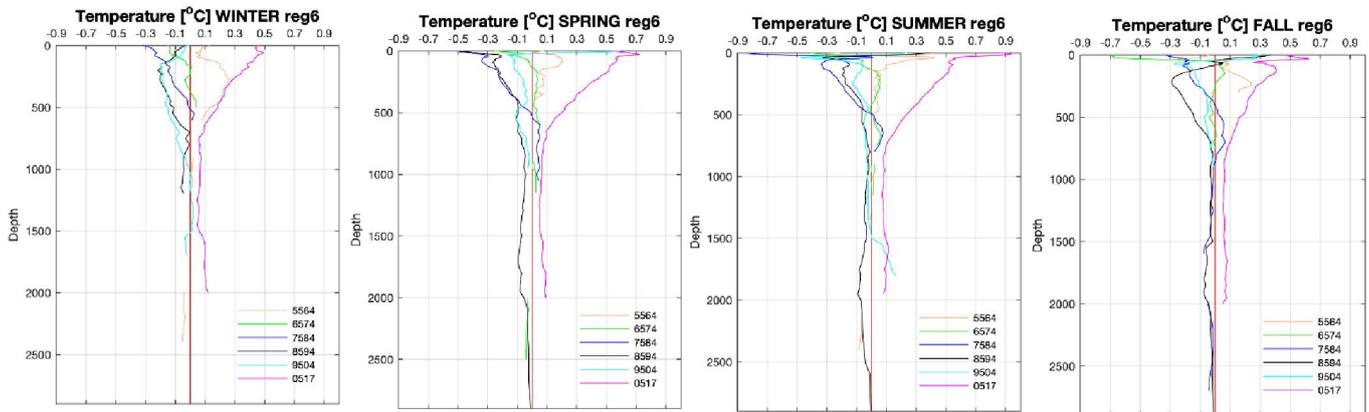


Figura 34: profili verticali dell'anomalia di temperatura nella regione 6 suddiviso per stagioni

La Figura 34 descrive le variazioni di temperatura lungo la colonna d'acqua nei vari decenni nella zona nord dello Ionio. Come osservato precedentemente, anche in questa regione il decennio 05-17 mostra una forte anomalia positiva rispetto agli altri periodi, raggiungendo una variazione di 0.9°C in estate. Le principali variazioni di anomalia si osservano nei primi 500m di profondità. In molte stagioni alcuni decenni non superano i 1000m di profondità per la mancanza di dati. Si nota che in tutte le stagioni il periodo 75-84 presenta un'anomalia negativa alla superficie, mentre al di sotto di 500m tale anomalia risulta positiva in primavera, in estate e in autunno. Il 95-04 mostra invece un aumento dell'anomalia negativa a circa 100-200m di profondità. In primavera, estate e autunno si osserva addirittura che l'anomalia passa da un valore positivo alla superficie, a un valore negativo a 100-200m. Si rileva invece una situazione opposta in primavera, estate e inverno del 55-64 in cui è presente un'anomalia positiva a tali profondità.

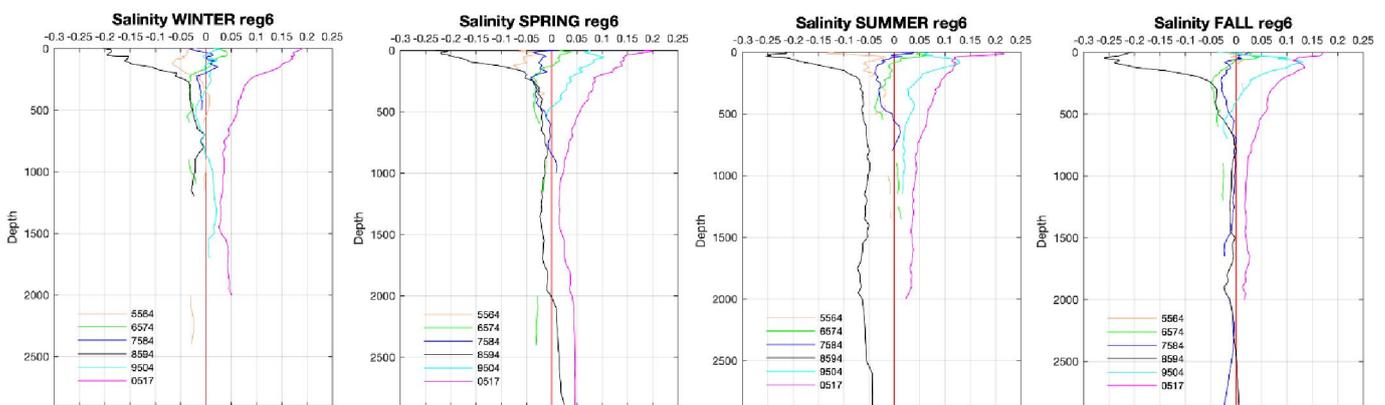


Figura 35: profili verticali dell'anomalia di salinità nella regione 6 suddiviso per stagioni

I profili di salinità in Figura 36 presentano una particolare variazione superficiale negativa nel periodo 85-94 che raggiunge in estate -0.25. Il decennio successivo invece mostra un'anomalia positiva a circa 100-200m, ben visibile in primavera, estate e autunno. La forte anomalia di salinità presente tra questi due decenni è dovuta al fenomeno del Northern Ionian Reversal il quale invertendosi da giro anticiclonico a giro ciclonico dal 1997 in poi ha provocato un aumento della salinità alle medie profondità nella parte dello Ionio Settentrionale e dell'Adriatico Meridionale (si veda Figura 4), visibile nel profilo del 95-04 (Pinardi et al.,2015).

3.3.3 Cretan Passage (Regione 10)

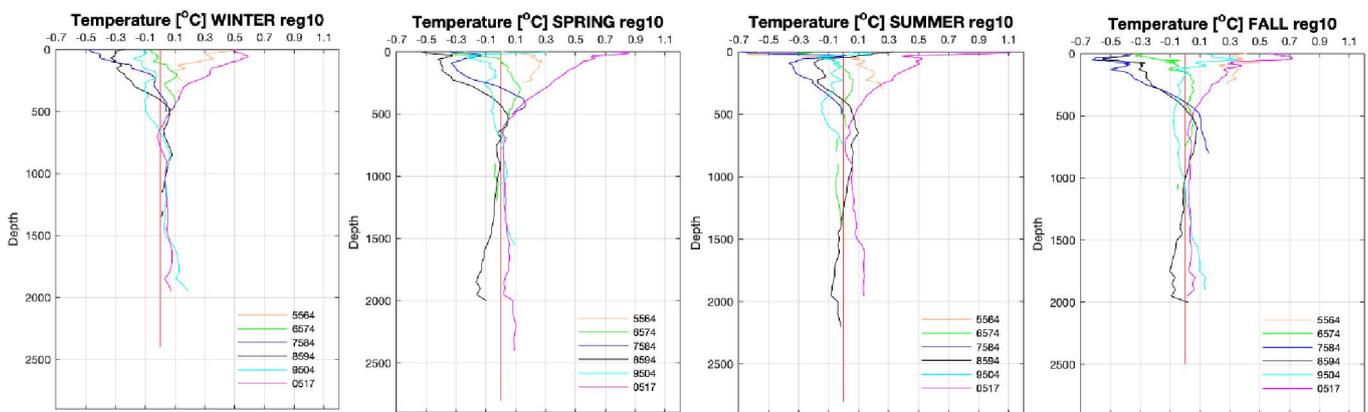


Figura 36: profili verticali dell'anomalia di temperatura nella regione 10 suddiviso per stagioni

In Figura 36 sono mostrati i profili di anomalia della temperatura nella zona che comprende il Cretan Passage (Figura 10). Si può notare che i periodi 55-64 e 05-17 presentano un'anomalia positiva e risultando dunque più caldi rispetto alla media. I decenni 75-84 e 85-94 presentano invece un'anomalia negativa nel primo strato fino a circa 200m, il seguito questa diminuisce diventando addirittura positiva a profondità di circa 400-600m.

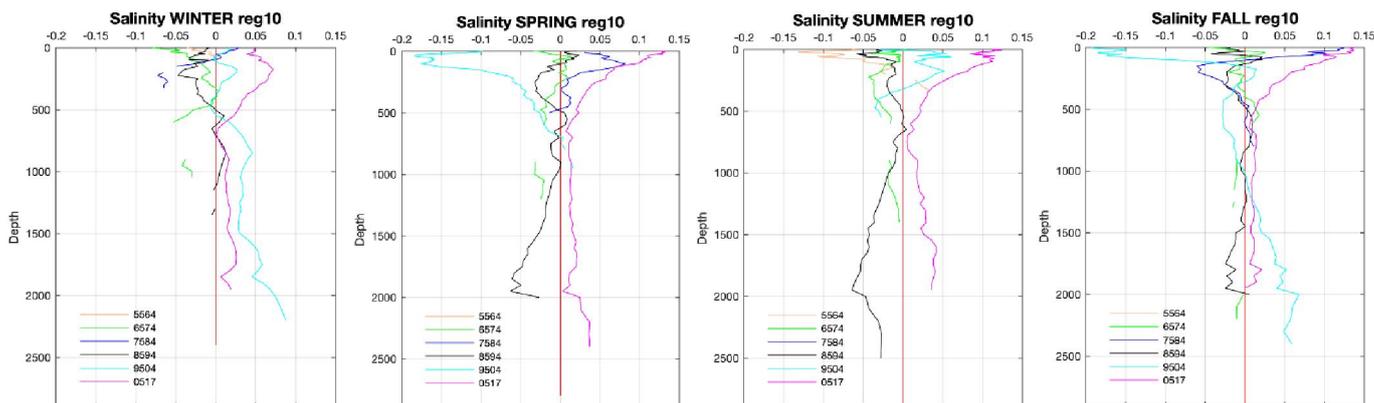


Figura 37: profili verticali dell'anomalia di salinità nella regione 10 suddiviso per stagioni

I profili di anomalia della salinità (Figura 37) presentano una forte variazione negativa nello strato superficiale del decennio 95-04 in primavera e in autunno, raggiungendo quasi -0.2. Nelle altre stagioni tuttavia tale variazione non è presente tanto che in estate l'anomalia risulta positiva. Il periodo 85-94 presenta in tutte le stagioni una lieve anomalia positiva a circa 500-600m di profondità, per poi tornare ad essere negativa in primavera, estate ed autunno fino a 2000m. È inoltre importante osservare che non sono presenti dati in estate nel periodo 75-84.

Osservando i profili sia della temperatura che della salinità si nota che è sempre presente un'anomalia positiva tra i 400m e i 700m nel decennio 85-94. In questo periodo sono stati registrati molti eventi di formazione di acque intermedie e profonde che hanno comportato l'aumento della salinità. Il periodo 75-84 mostra somiglianze con il profilo 85-94.

3.3.4 Rhode Gyre (Regione 11)

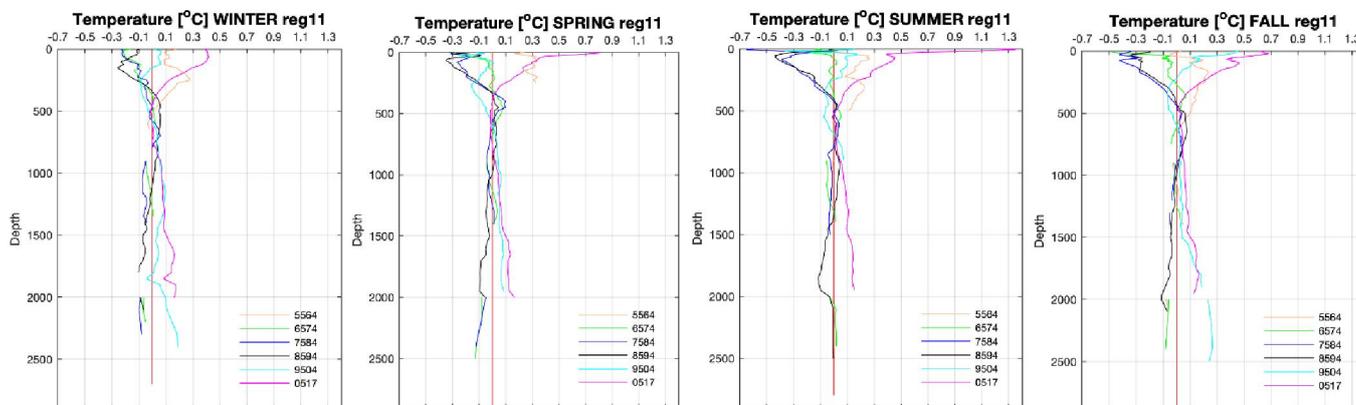


Figura 38: profili verticali dell'anomalia di temperatura nella regione 11 suddiviso per stagioni

In Figura 38 sono raffigurati i profili verticali di anomalia di temperatura nel Levantino settentrionale. I periodi 75-84 e 85-94 presentano un'anomalia negativa in superficie, mentre scendendo in profondità si nota che questa diventa progressivamente positiva verso i 400-700m circa. I decenni 55-64 e 05-17 presentano invece anomalie positive. Si nota tuttavia che il periodo 05-17 tende ad avvicinarsi molto al profilo 0, cosa che non è stato possibile osservare nelle altre regioni. Alle profondità di 1500-2000m si possono osservare solo tre profili di anomalia dei periodi 85-94, 59-04 e 05-17. Mentre gli ultimi due decenni presentano un'anomalia positiva, l'85-94 mostra invece un'anomalia negativa.

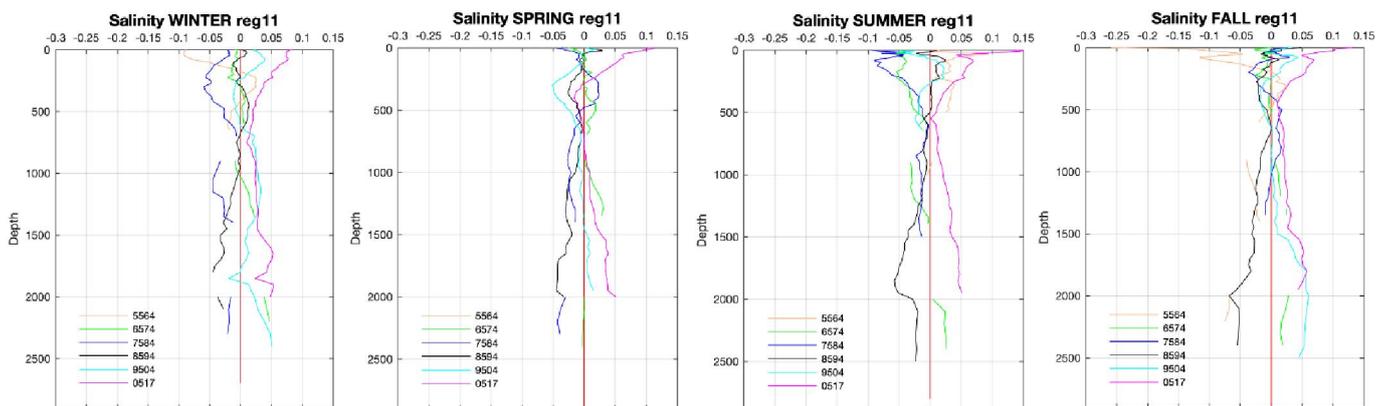


Figura 39: profili verticali dell'anomalia di salinità nella regione 11 suddiviso per stagioni

I profili di salinità (Figura 39) mostrano anch'essi un'anomalia positiva del decennio 05-17, tanto. In primavera tale anomalia risulta però essere negativa alle profondità intermedie attorno ai 400m. Anche il periodo 95-04 mostra un'anomalia negativa a circa 300-400m di profondità. Il periodo 75-84 osserva invece un'anomalia positiva a 300-400m per la primavera, mentre per l'estate e l'autunno tale anomalia si riscontra a profondità di 500-1000m. Si osserva che in primavera non è presente il profilo 55-64. Nelle altre stagioni invece mostra un'anomalia negativa nella parte superficiale dell'inverno e dell'autunno che diviene positiva a circa 300m. In estate invece questo decennio mostra soltanto un'anomalia positiva fino a 500m

3.4 Diagrammi TS

I diagrammi TS sono dei grafici che permettono di mettere in correlazione i dati di temperatura con quelli di salinità prelevati nello stesso punto e nello stesso istante di tempo. Questi consentono inoltre di osservare l'aumento della densità delle masse d'acqua. I seguenti diagrammi TS sono riferiti alle quattro regioni di formazione delle masse d'acqua e permettono di individuare se è avvenuta una variazione della densità tra le decadi considerate. Ogni

diagramma presenta i valori di salinità nell'asse x e i valori di temperatura nell'asse y. Le proprietà caratteristiche dell'acqua definiscono che un aumento di salinità induce un aumento della densità del liquido. L'acqua inoltre presenta la sua massima densità a una temperatura di 4°C, perciò anche una diminuzione della temperatura può portare a un aumento della densità.

REGIONE	MASSA D'ACQUA	ANNO	TEMPERATURA (°C)	SALINITÀ	RIFERIMENTI
Golfo del Leone	WMDW	1988	12,75	38,44	Somot et al., 2016
		1989	12,78-12,79	38,43-38,44	
		1992	12,77-12,78	38,43-38,44	
		1995	12,78	38,43	
		2006	12,87-12,91	38,47-38,48	
		2013	12,90-12,92	38,49-38,50	
Ionio Settentrionale	EMDW	1958	13,72-15,22	38,75-38,97	Roether et al., 1997
		1974	14,62-15,05	38,86-38,94	
		1995	13,35	38,69	Klein et al., 1998
Mare di Creta	CIW/CDW	1979-1981	14,82-16,39	38,95	Roether et al., 1997
		1982-1984	14,82-16,39	39,02	Roether et al., 1997
		1995	14,84	39,06	Klein et al., 1998
Rhode Gyre	LIW/LDW	1976	16,24-16,38	39,14-39,16	Roether et al., 1997
		1987	15,52	38,98	
		1992	15,2-15,5	39,1-39,2	
		1995	14,23	38,82	

Tabella 3: tabella relativa a valori di temperatura e salinità nei periodi di formazione delle masse d'acqua

La

Tabella 3 indica i valori di temperatura e salinità caratteristici delle masse d'acqua nel Golfo del Leone, nello Ionio settentrionale, nel Mare di Creta e nel Rhode Gyre, come riportati in letteratura e in periodi diversi. Questi valori di riferimento permettono di individuare le relative masse d'acqua nei diagrammi TS.

3.4.1 Regione 3 (Golfo del Leone)

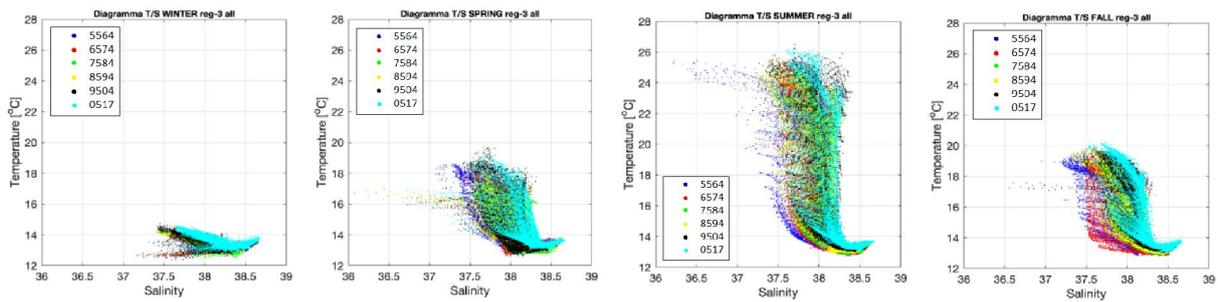


Figura 40: diagrammi T/S della regione 3 suddiviso in stagioni

I diagrammi TS in Figura 40 permettono di osservare la tendenza generale a un aumento dei valori di temperatura e salinità nel tempo. Si osserva una variazione stagionale delle caratteristiche termocline con valori invernali che si aggirano attorno i 12-15°C di temperatura e 37-39 di salinità, mentre in estate si hanno 12-27°C e 36,5-39. In primavera e in autunno il range di valori è simile, ovvero tra 12-20°C e tra 36,5-39 per la salinità. I dati sono disposti partendo dalla superficie nella parte più in alto, fino alla profondità nell'estremità inferiore. Si osserva inoltre che i grafici seguono un andamento a forma di S rovesciata. I diagrammi mostrano un aumento di salinità in tutte le stagioni, mentre l'aumento di temperatura è maggiormente evidente in estate e autunno negli strati superficiali ma generale nella parte profonda. In inverno questo non si osserva molto bene perché i dati sono tutti più ravvicinati tra loro a causa delle basse temperature presenti sia in superficie che in profondità.

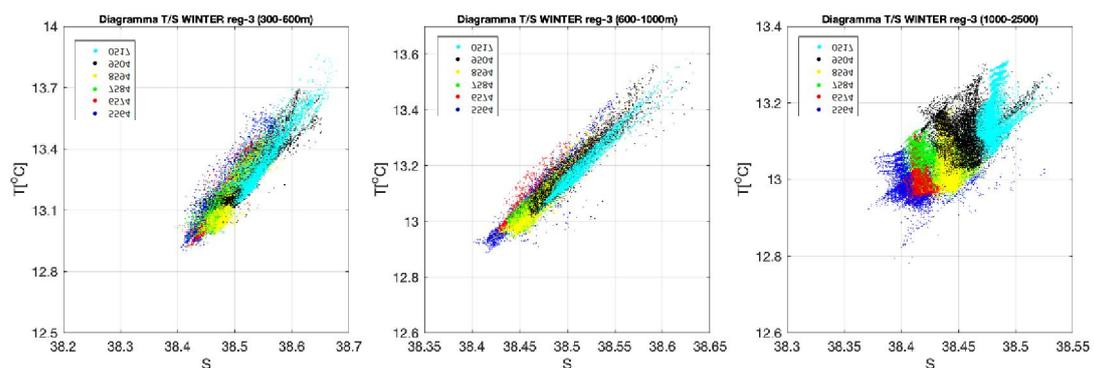


Figura 41: diagrammi TS della regione 3 nella stagione invernale negli stati di profondità: 300-600m, 600-1000m; 1000-2500m.

La Figura 41 raffigura l'andamento della temperatura e salinità nei livelli di profondità: 300 - 600m, 600-1000m e 1000-2500m. È importante tenere in considerazione che i limiti di temperatura e salinità degli assi sono diversi per ogni profondità. È stata scelta la stagione invernale perché questa permette una migliore osservazione delle variazioni delle masse

d'acqua. Nel livello tra 300m e 600m si osserva un aumento progressivo di temperatura e salinità delle acque intermedie con massimi valori nei periodi 1995-2004 e 2005-2017. È possibile che questo fenomeno sia dovuto alla propagazione del Transiente del Mediterraneo Orientale che ha provocato un aumento della temperatura e della salinità a circa 250m-350m. Il decennio 1955-1964 mostra invece acque meno salate ma con temperature analoghe alla decade successiva. Anche tra 600-1000m di profondità i valori più alti di temperatura e salinità si notano nei decenni 95-04 e 05-17. Lo strato profondo tra 1000m e 2500m, in cui risiede la WMDW, mostra un graduale aumento della temperatura (da 12.75°C a 12.90°C) e salinità (da 38.44 a 38.50) che si verifica durante i decenni, come indicato anche dai valori in

Tabella 3 presenti in letteratura (Somot *et al.*, 2016).

3.4.2 Regione 6 (Ionio Settentrionale)

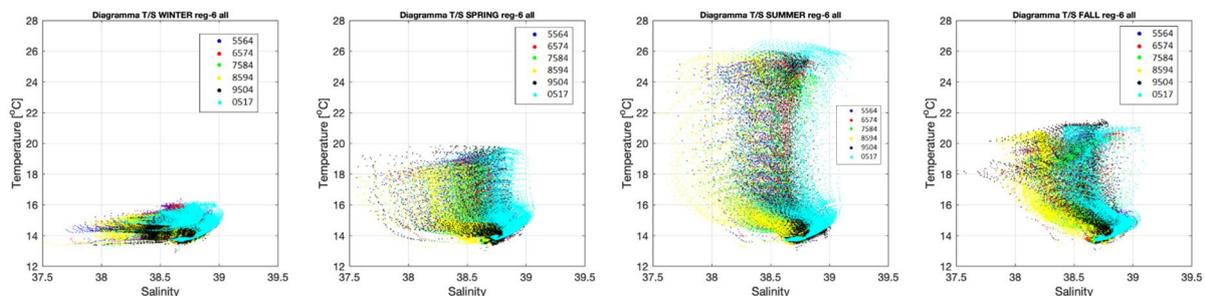


Figura 42: diagrammi T/S della regione 6 suddiviso in stagioni

I diagrammi TS della regione 6 mostrano un intervallo di temperatura di 12-17°C e di salinità di 37.5-39 in inverno mentre l'estate è caratterizzata da un intervallo più ampio di temperatura (13-27°C) e salinità (37.5-39.5). La primavera è caratterizzata da temperature superficiali più basse rispetto all'autunno. Si nota che il decennio 85-94 presenta, specialmente in estate e autunno, dei valori più bassi di salinità dovuti all'arrivo di acque atlantiche grazie all'inversione della corrente superficiale lungo il margine occidentale (si veda Figura 3a). I valori caratteristici riportati in

Tabella 3 di Roether *et al.* (1997) e Klein *et al.* (1998) confermano questo segnale. Come per la regione del Golfo del Leone, anche nello Ionio Settentrionale si riscontrano i valori massimi per entrambe i parametri nel periodo recente 2005-2017.

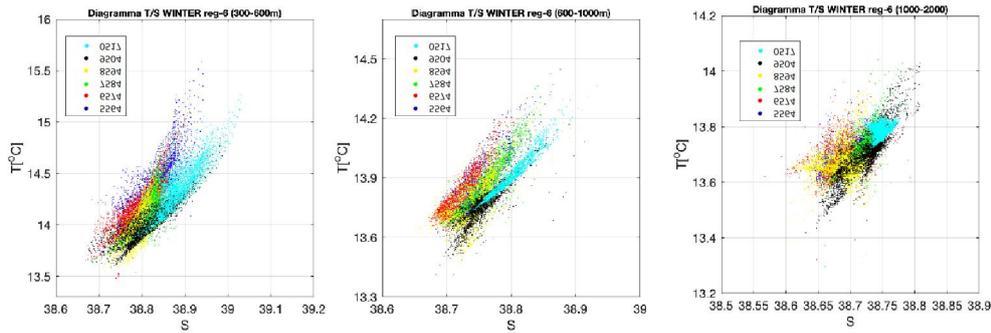


Figura 43: diagrammi TS della regione 6 nella stagione invernale negli stati di profondità: 300-600m, 600-1000m; 1000-2500m

In Figura 43 sono riportati i diagrammi TS negli strati intermedi e profondo in cui è evidente lo slittamento di temperatura e salinità verso valori più alti nella decade 2005-2017. Le acque intermedie e profonde del periodo 95-04 sono più dense rispetto agli altri decenni, avendo valori di salinità intermedi ma temperature tendenzialmente più basse.

3.4.3 Regione 10 (Cretan Passage)

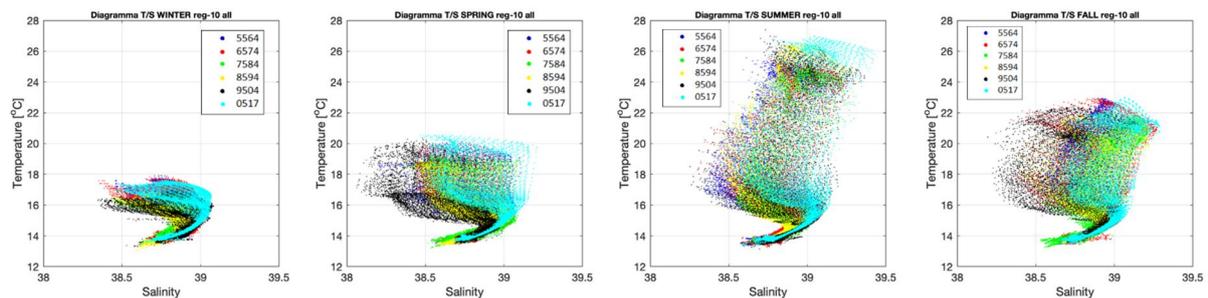


Figura 44: diagrammi T/S della regione 10 suddiviso in stagioni

La Figura 44 si riferisce alla regione 10 situata a nord del bacino levantino, in corrispondenza del Rhode Gyre. Si può osservare che il periodo 95-04 presenta una buona porzione di dati con temperature e salinità più basse rispetto agli altri decenni, sia in inverno che in primavera e autunno. Anche nella regione 10 il decennio 05-17 è il più caldo e salato di tutti i periodi e questo si può notare in particolare in primavera, dove raggiunge salinità di 39-39.2, e in estate, dove sono presenti dati con 25-27°C e 39-39,5 di salinità.

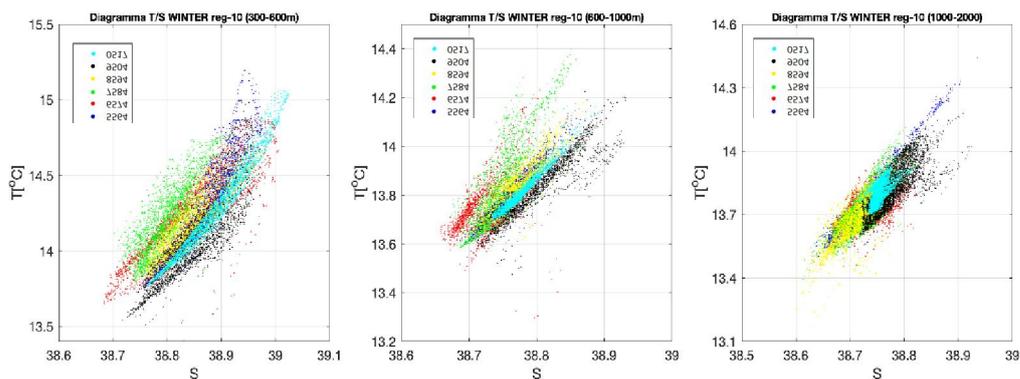


Figura 45:diagrammi TS della regione 10 nella stagione invernale negli stati di profondità:300-600m, 600-1000m; 1000-2500m.

In Figura 45 si osserva che il periodo 95-04 presenta i valori più bassi di temperatura e i livelli più alti di salinità tra 300m-600m e tra 600m-1000m di profondità. A profondità di 1000m-2000m la decade 55-64 mostra masse d’acqua a temperatura più elevata rispetto agli altri decenni, mentre i valori caratteristici del periodo 2005-2017 si collocano tra 13.7-14°C e 38.7-38.8, al centro del range di variazione di entrambe i parametri.

3.4.4 Regione 11 (Rhode Gyre)

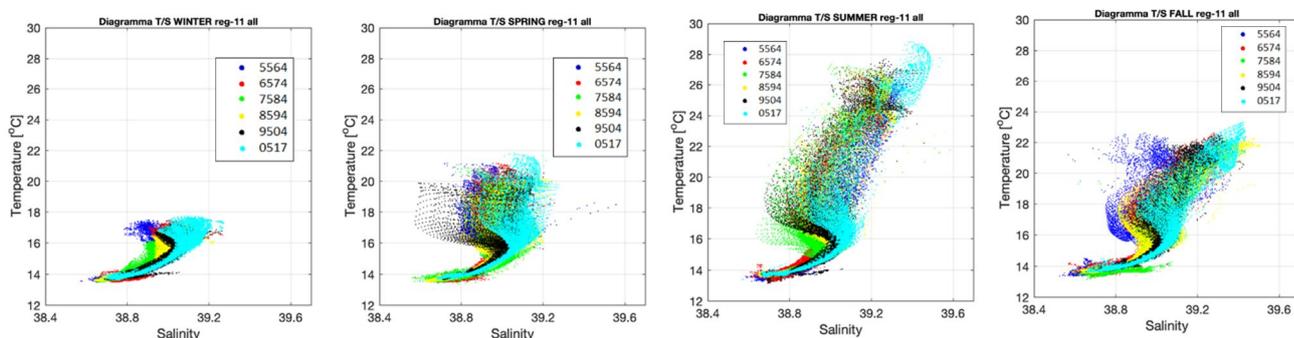


Figura 46:diagrammi T/S della regione 11 suddiviso in stagioni

La Figura 46 presenta i diagrammi TS della regione 11 in cui avviene la formazione di acque intermedie levantine (LIW). Si può notare che il periodo 05-17 presenta in estate i maggiori livelli di temperatura e salinità, raggiungendo i 25-30°C e salinità di 39,2-39,4. In primavera invece si osserva che il periodo 95-04 mostra una salinità inferiore rispetto agli altri decenni, con un intervallo di 38,5-38,8. In autunno invece il decennio che presenta il minor livello di salinità è il 55-64.

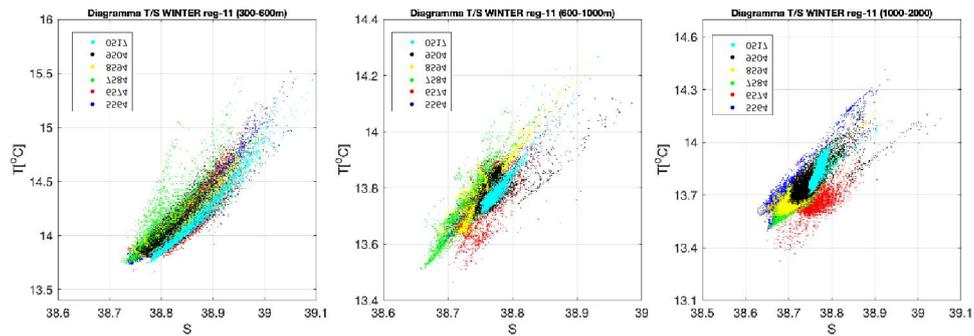


Figura 47: diagrammi TS nella regione 11 in inverno negli stati di profondità: 300-600m, 600-1000m; 1000-2500m.

Figura 47 mostra acque intermedie meno salate nel periodo 75-84 e più salate nella decade 65-74. Le temperature più basse sotto i 600m caratterizzano i periodi 65-74 e 75-84. Il periodo 05-17 presenta alti valori di temperatura e salinità e, come nel Cretan Passage, i range di variazione sono ridotti rispetto agli altri periodi. Il decennio 65-74 presenta bassi valori di temperatura, alla profondità di 1000m-2000m ma anche le salinità più elevate, di circa 38,8 rispetto agli altri decenni alla stessa temperatura.

CAPITOLO 4

CONCLUSIONI

In questa tesi è stato possibile osservare le principali variazioni di temperatura e salinità nel Mar Mediterraneo durante il periodo 1955-2017. I campi climatologici utilizzati provenienti dal WOA 2018 hanno permesso di elaborare e osservare dati in intervalli di tempo decennali, i quali sono stati aggiornati di recente.

La parte introduttiva ha permesso di capire le proprietà generali del Mar Mediterraneo e le dinamiche della circolazione superficiale e intermedia. Inoltre è stato possibile conoscere i vari fenomeni verificatisi nel bacino, come il Northern Ionian Reversal e il Transiente del Mediterraneo Orientale, e le formazioni delle masse d'acqua che si sono verificate nel Golfo del Leone, nel Mare Adriatico Meridionale, nel Mare di Creta e nel Rhode Gyre.

Prima di esaminare le regioni specifiche, è stato osservato l'andamento generale della temperatura e della salinità nel Mediterraneo a 0m, 300m e 1000m di profondità, notando che l'ultimo decennio risultava tendenzialmente più caldo e salato. Tuttavia non è stato possibile valutare tali variabili per tutti i decenni, soprattutto ad elevate profondità, a causa della mancanza di dati che non hanno permesso di ottenere risultati attendibili. È stato inoltre osservato che il numero di dati prelevati in tutto il bacino era maggiore, in termini di quantità, a livello superficiale e che questi diminuivano con l'aumentare della profondità, fino a quantità inferiori a 1000 dati alla profondità di 2000m.

In seguito è stato possibile osservare i profili verticali di anomalia nel Mediterraneo Orientale e Occidentale per dare uno sguardo generale all'andamento della temperatura e della salinità nei decenni. Grazie alle mappe raffiguranti le differenze tra i decenni 85-94 e 95-04 è stato possibile notare le zone in cui la temperatura e la salinità sono aumentate o diminuite durante i due periodi. Si è dedotto che alcune differenze tra i decenni potrebbero essere dovute ad apporti fluviali, per quanto riguarda la parte più superficiale, e all'evento del Northern Ionian Reversal avvenuto proprio a cavallo di questi due periodi, che influenzò sia le masse superficiali che quelle intermedie tra la metà degli anni 80 e la metà dei '90. Grazie ai profili verticali di anomalia della temperatura e della salinità, riferiti alle quattro regioni d'interesse, è stato possibile analizzare, lungo la colonna d'acqua, l'andamento nel corso dei decenni e di capire in generale le variazioni dovute agli eventi di formazione delle masse d'acqua. In tutti i profili si

è notato che il periodo 05-17 presenta sempre un'anomalia positiva sia della temperatura che della salinità. I diagrammi TS invece hanno permesso di osservare come si dispongono i dati di temperatura in relazione a quelli della salinità, consentendo di verificare quali fossero i periodi costituiti da masse d'acqua a maggiore densità e di capire come la formazione delle masse d'acqua abbia influenzato le proprietà termoaline.

Questo studio ha permesso di definire un quadro generale delle variazioni dei valori di temperatura e salinità durante i decenni, tuttavia a causa dell'utilizzo di medie calcolate su un periodo di tempo di 10 anni, non è stato possibile verificare le variazioni avvenute nei singoli anni. Le medie climatologiche di ciascun decennio possono essere state influenzate dalle differenze dei diversi anni, per questo sarebbe necessario osservare le deviazioni standard dei singoli anni del decennio. Oltretutto i dati mostrano quantità e distribuzioni spaziali diverse nelle varie decadi e questo potrebbe avere inciso sui risultati delle medie climatologiche. Inoltre i profili verticali delle anomalie e i diagrammi TS non hanno tenuto conto dell'errore dovuto all'aumento della pressione che si verifica scendendo in profondità. La tesi può quindi essere utile come lavoro preliminare per futuri studi più precisi e accurati.

In ultimo si può confermare che il data set utilizzato, WOA2018, riesce a catturare le principali variazioni termoaline nel Mediterraneo riportate in letteratura.

BIBLIOGRAFIA

Articoli consultati:

Brankart P. M., Pinardi N. et al., 2000, *Abrupt Cooling of the Mediterranean Levantine Intermediate Water at the Beginning of the 1980s: Observational Evidence and Model Simulation*, in *Journal of physical oceanography*, 31: 2307-2320.

Garcia H.E., T. Boyer, O.K. Baranova, R.A. Locarnini, A.V. Mishonov, C.R. Paver, J.R. Reagan, D. Seidov, I.V. Smolyar, K.W. Weathers, M.M. Zweng, 2018, *World Ocean Atlas 2018* (pre-release): Product Documentation. A. Mishonov, Technical Editor.

Klein B., Roether W., Manca B. B., Bregant D., Beitzel V., Kovacevic V., Luchetta A., 1998 *The large deep water transient in the Eastern Mediterranean*, in *Deep-Sea Research I*, 46: 371-414

Pinardi N., Zavatarelli M., Adani M., Coppini G., Fratianni C., Oddo P., Simoncelli S., Tonani M., Lyubartsev V., Dobricic S., Bonaduce A., 2015, *Mediterranean Sea large-scale low-frequency ocean variability and water mass formation rates from 1987 to 2007: A retrospective analysis*, in *Progress in oceanography*, 132: 318-332.

Rixen M., Beckers J.-M., Levitus S., Antonov J., Boyer T., Maillard C., Fichaut M., Balopoulos E., Iona S., Dooley H., Garcia M.-J., Manca B., Giorgetti A., Manzella G., Mikhailov N., Pinardi N., Zavatarelli M., 2005, *The Western Mediterranean Deep Water*, in *Geophysical research letter*, 32, doi:10.1029/2005GL022702.

Roether W., Klein B., Beitzel V., Manca B. B., 1997, *Property distributions and transient-tracer ages Intermediate Water in the Eastern Mediterranean, in Levantine*, in *Journal of Marine Systems*, 18: 71-87.

Simoncelli S., Korres G., Pinardi N., Fratianni C., Clementi E., Tintoré J., 2017, *Mediterranean Sea*, in *Journal Of Operational Oceanography*, 275-279.

Somot S., Houpert L., Sevault F., Testor P., Bosse A., Taupier-Letage I., Bouin M. N., Waldman R., Cassou C., Sanchez-Gomez E., Durrieu de Madron X., Adloff F., Nabat P., Herrmann M., 2016, *Characterizing, modelling and understanding the climate variability of the deep water formation in the North-Western Mediterranean Sea*, in *Clim Dyn*, doi: 10.1007/s00382-016-3295-0.

Zenetos A., Siokou-Frangou I., Gotsis-Skretas O., Groom s., National Centre for Marine Research (Greece, NCMR), 2004, *Il Mare Mediterraneo*, in *EEA Project Manager Anita Kunitzer*;

url: <http://www.arpalombardia.it/sites/DocumentCenter/Documents/I MARI/cap9.pdf>

[14/02/2019]

RINGRAZIAMENTI

Vorrei innanzitutto ringraziare il mio relatore, il professor Marco Zavatarelli, e la mia correlatrice, la dottoressa Simona Simoncelli, per avermi aiutato molto nell'elaborazione di questa tesi e per avermi indirizzato nella giusta strada.

Ringrazio la mia famiglia, soprattutto i miei genitori ma anche mio fratello e le mie due sorelle, per avermi sempre sostenuta e aiutata nei momenti più difficili e per essersi fatti in quattro per permettermi di studiare e lavorare alla tesi.

Ringrazio il mio ragazzo Mark per essere sempre stato al mio fianco in qualsiasi cosa e per aver ascoltato tutte le mie paranoie oltre ad avermi risolto molti problemi. Un grazie anche a Miriam e Giuliano che portano sempre una grande allegria contagiosa.

Infine vorrei ringraziare tutti i miei amici su cui posso sempre contare e che sanno sempre come tirarmi su di morale.