

ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Scuola di Scienze

Corso di Laurea in Biologia Marina

VARIAZIONI TEMPORALI DEL
FITOPLANCTON DEL MAR
MEDITERRANEO E ANOMALIE
CLIMATOLOGICHE

Tesi di Laurea in Oceanografia Fisica e Biologica

Relatore:

Prof. MARCO ZAVATARELLI

Correlatrice:

Dott.ssa SIMONA SIMONCELLI

Presentata da:

MICHELA BALLARDINI

Sessione Unica

Anno Accademico 2019/2020

“A chi non si arrende”

Sommario

CAPITOLO 1 INTRODUZIONE.....	5
1.1 Il Mediterraneo, fisica e circolazione.....	5
1.2 Produzione primaria e clorofilla.....	9
1.3 Eutrofizzazione.....	10
1.3.1 Effetti dell'eutrofizzazione.....	12
1.4 Algal blooms.....	13
1.5 Obiettivo della tesi	15
CAPITOLO 2 MATERIALI E METODI.....	16
2.1 Misure remote della temperatura e della concentrazione di clorofilla superficiale dell'Oceano.....	16
2.2 I dati utilizzati	17
2.3 Controllo di qualità dei dati di concentrazione di clorofilla superficiale.....	18
CAPITOLO 3 RISULTATI E DISCUSSIONI.....	19
3.1 Climatologia annuale temperatura della temperatura superficiale.....	19
3.2 Climatologia stagionale della temperatura superficiale.....	20
3.3 Climatologia annuale della clorofilla superficiale.....	22
3.4 Climatologia stagionale della clorofilla superficiale.....	23
3.5 Le variazioni Ventennali.....	25
3.5.1 Serie temporale con media mobile della temperatura superficiale.....	25
3.5.2 Serie temporale con media mobile della clorofilla superficiale.....	27
3.6 Trend temporale di variazione della temperatura superficiale.....	29
3.7 Trend temporale di variazione della clorofilla superficiale.....	37
CAPITOLO 4 CONCLUSIONI.....	44
Bibliografia.....	48

ABSTRACT

Questa tesi si basa sui dati, rilevati in maniera remota da satellite, di temperatura e concentrazione di clorofilla superficiali del Mare Mediterraneo nel periodo 1998-2017. Lo scopo del lavoro è la valutazione dei trend temporali di variazione. Sono state generate mappe climatologiche annuali e stagionali. Inoltre sono stati calcolati anche i trend temporali di variazioni della temperatura e della clorofilla superficiale. Lo scopo ultimo di questa tesi è di identificare, se esistenti, le possibili interazioni tra le variazioni delle due proprietà. La fisica e la circolazione del Mediterraneo sono elementi fondamentali per la comprensione delle variazioni delle variabili biogeochimiche. Sono state calcolate anche le variazioni ventennali, considerando le serie temporali calcolate con una procedura di media. Per questo, in questo elaborato si è voluto prendere in considerazione oltre che l'intero Bacino anche delle zone particolari del Mediterraneo per valutare meglio la climatologia annuale e stagionale sia per la temperatura superficiale che per la clorofilla superficiale anche con il calcolo dei trend temporali di variazione per entrambe le variabili. Le aree sono del Nord Ovest del Mediterraneo, l'area del Golfo del Leone, il Mar Adriatico meridionale e la regione Sud-Est dell'Isola di Creta, dove la circolazione generale del Bacino è caratterizzata dalla presenza del gyre anticiclonico denominato "Ierapetra gyre".

Capitolo 1 INTRODUZIONE

1.1 Il Mediterraneo, fisica e circolazione

Il Mar Mediterraneo (dal latino *Mediterraneus* in mezzo alle terre) è un bacino semichiuso situato tra Europa, Nord-Africa e Asia Occidentale che si estende in Longitudine fra -5° e 36° Est e in Latitudine tra 32° e 46° Nord. Comunica con l'Oceano Atlantico attraverso lo Stretto di Gibilterra e con il Mar di Marmara attraverso i Dardanelli con una profondità media di 2500m.

Il bacino Mediterraneo può essere suddiviso in due sottobacini principali: il Mediterraneo Occidentale e quello Orientale separati dallo Stretto di Sicilia (Pinardi et al., 2015).

Il Mediterraneo però è anche una importante eco-regione del pianeta con notevoli caratteristiche di biodiversità (Coll et al., 2012). L'ambiente del Mediterraneo è una combinazione di fattori geomorfologici e climatici.

Tuttavia, la forte antropizzazione delle coste del Mediterraneo è, anche nel Mediterraneo, un serio problema ambientale. L'impatto delle attività umane, determina l'eutrofizzazione delle acque, l'inquinamento causato dalle acque di scarico contenenti metalli pesanti, composti organici, dagli sversamenti di idrocarburi ed anche l'eccessivo sfruttamento delle risorse rinnovabili marine, come pesca a strascico, portano una diminuzione importate della biodiversità stessa e l'introduzione di specie aliene causando rischio per le specie, habitat ed ecosistemi.

La circolazione del Mediterraneo è dovuta ad un particolare equilibrio tra meso-scala e variabilità stagionale e inter-annuale (Robinson et al., 2001), dove per meso-scala si intende una dimensione geografica dei sistemi meteorologici, intermedia tra la scala sinottica e la micro-scala. L'estensione orizzontale va da una decina di km a qualche centinaia di km, attraverso la meso-scala si analizzano fenomeni come la circolazione atmosferica, le precipitazioni associate alle zone frontali ed eventi estremi (uragani, tempeste dalle medie latitudini). La meso-scala si suddivide in sotto-scale:

- Sistemi a meso-scala α : da 100km a 300km di estensione;
- Sistemi a meso-scala β : da 40km a 100km di estensione;
- Sistemi a meso-scala γ : < di 40km di estensione;

La forte interazione tra le diverse scale rende difficile studiarla. I due sotto bacini mostrano un comportamento diverso: nel bacino Occidentale domina la variabilità stagionale mentre in quello Orientale si ha una variabilità sia stagionale sia interannuale (Korres et al., 2000).

Nonostante le sue dimensioni limitate, il Mar Mediterraneo è un ambiente marino più complesso sulla Terra, a causa della varietà delle scale spaziali e temporali dei processi fisici che si verificano lì, come la formazione di acque profonde, la circolazione termoalina, i gyres dei sub-Bacini (D'Ortenzio, 2009) che si estendono spazialmente dalla meso- alla grande-scala (Robinson et al., 2001) e temporalmente dalla scala stagionale a quella decadale (Rixen et al., 2005). Molto importante per il nostro clima è la circolazione Termoalina, o “nastro trasportatore” per indicare una combinazione di correnti che formano una circolazione su scala mondiale, dall'Oceano Atlantico attraverso l'Oceano Indiano e il Pacifico per poi tornare indietro. Circolazione termoalina perché i due fattori importanti che la controllano sono la temperatura, (termo-) e la salinità (-alina). Questi due fattori determinano la densità dell'acqua, nel caso del Mediterraneo come in figura 1 (N. Pinardi & Masetti, 2000) hanno descritto la circolazione termoalina, che mostra tre principali “cinture” di circolazione verticali, meridionali e zonali. La prima, una fascia di circolazione verticale zonale aperta, poco profonda (0-500m.) è associata all'afflusso dall'Atlantic Water (AW) a Gibilterra che viene poi trasformata in Levantine Intermediate Water (LIW) nel Mediterraneo Orientale. La LIW è una componente importante delle acque profonde del Mediterraneo Occidentale che contribuisce anche alla maggior parte delle masse d'acqua in uscita (N. Pinardi & Masetti, 2000). Le altre celle meridionali sono simili alla circolazione meridionale dell'Atlantico settentrionale, guidate dai processi di formazione di masse d'acqua profonde che si verificano nelle aree del Mediterraneo settentrionale come il Golfo del Leone e il Mar Adriatico. La formazione di acque profonde in queste aree è influenzata, se non controllata da LIW presenti prima degli eventi di formazione. Le celle meridionali e zonali sono interconnesse e le celle meridionali del Mediterraneo Orientale e Occidentale possono comunicare anche su lunghe scale temporali. La cella zonale si ritiene abbia una scala temporale decennale (50-80anni). Da un'integrazione del modello di Circolazione Generale (GCM), la cella zonale LIW sostiene le celle meridionali contribuendo al bilancio salino delle acque profonde di nuova formazione nelle aree dell'Adriatico e del Golfo del Leone. Probabilmente è lo stesso meccanismo che collega le lingue di sale del Mediterraneo nell'Atlantico al mantenimento della circolazione dell'Atlantico settentrionale (N. Pinardi & Masetti, 2000).

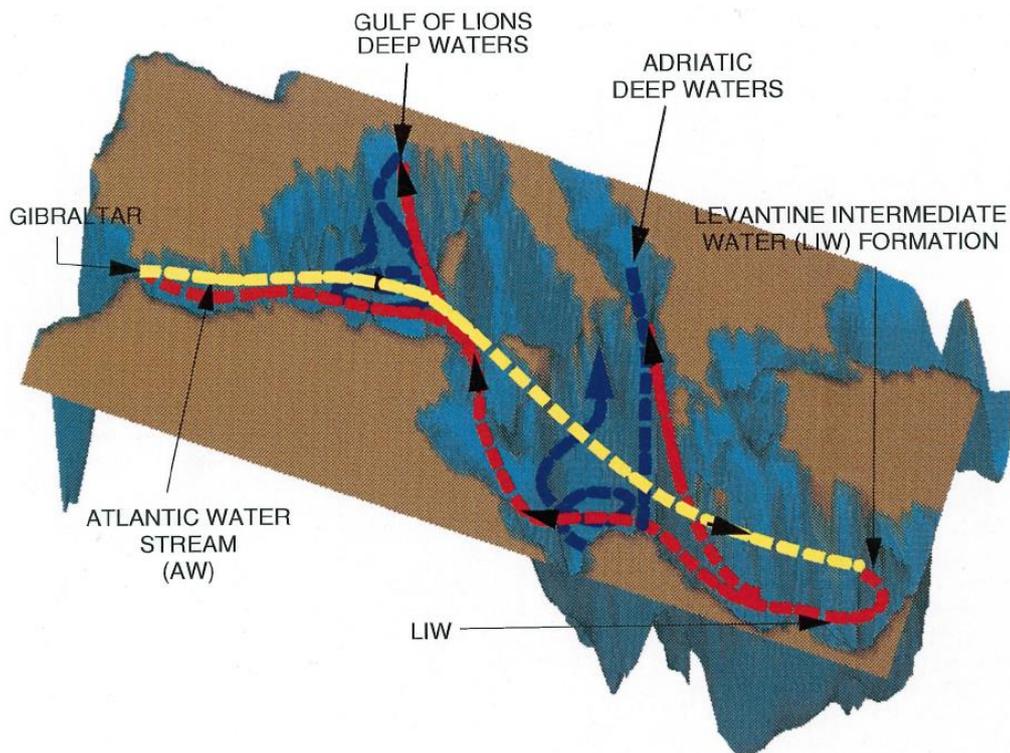


Figura 1- Rappresentazione della Circolazione Termoalina del Mediterraneo con i principali sistemi di nastri trasportatori indicati con le linee tratteggiate con colore diverso. Il giallo indica il flusso AW che è l'evidenza superficiale del nastro trasportatore zonale del Mediterraneo, mentre in rosso è indicato il ramo di ricircolo LIW a media profondità della circolazione termoalina. Le linee blu invece indicano le celle meridionali indotte dalle acque profonde. La diramazione LIW dal nastro trasportatore zonale collega i nastri meridionali e zonali. Estratta da (N. Pinardi & Masetti, 2000).

La circolazione del Mediterraneo è forzata come quella di tante maggiori aree oceaniche del mondo, dai diversi effetti dello stress del vento e dai flussi di calore e di massa, (Korres et al., 2000; Castellari et al., 1998). Le aree settentrionali del Bacino sono caratterizzate da circolazioni cicloniche con processi di formazione di acqua profonda e intermedia, mentre le aree meridionali da circolazione anticiclonica, (Pinardi et al., 2015). Le acque profonde dei sottobacini Occidentale e Orientale sono completamente separate dal rilievo batimetrico dello Stretto di Sicilia (profondità massima di 500 m.). Le acque profonde del Mediterraneo Occidentale si formano nell'area del Golfo del Leone, mentre quelle del Mediterraneo Orientale nell'Adriatico Meridionale, dove possono formarsi gyre. Uno schema della circolazione media superficiale (0-200 m. di profondità) del Mediterraneo è riportato in Fig. 2. Tale schema risulta dall'analisi di 23 anni di simulazione numerica della circolazione generale del Mediterraneo condotta forzando il modello con accurate

analisi del forzante atmosferico: in tabella 1 sono indicati i nomi delle principali correnti e gyres. La circolazione sembra sia la stessa fino ai 200-300m. di profondità (Pinardi et al., 2015).

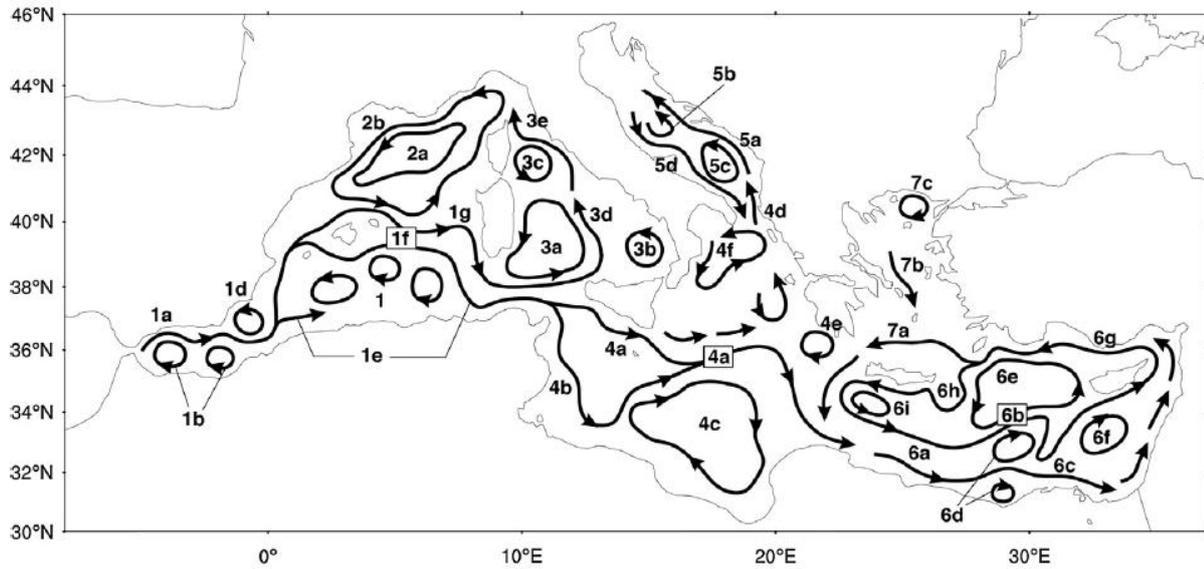


Figura 2 - Schema della circolazione generale superficiale per il Mar Mediterraneo ottenuta da dati di rianalisi per il periodo 1987-2007 (Pinardi et al., 2015).

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-Provenal-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- Indice per le strutture di circolazione superficiale e di profondità intermedia principali del Mediterraneo.

1.2 Produzione primaria e clorofilla

Dal punto di vista trofico il Mediterraneo è considerato un bacino oligotrofico (Sournia, 1973) poiché la produzione primaria è generalmente debole e la concentrazione di clorofilla nelle aree oceaniche aperte raramente supera i 2-3 mg/m³.

La dinamica stagionale del fitoplancton segue prevalentemente un tipico ciclo temperato, con aumento della biomassa nel tardo Inverno, inizio Primavera, circa due o tre mesi a seconda della

regione, mentre in Estate si hanno valori bassi. Si sono osservati anche i classici regimi di fioritura primaverile, soprattutto nel Mediterraneo Nord-Occidentale, in modo intermittente in altre quattro aree del Bacino. Nel Mar Mediterraneo, infatti, si osservano accumuli di fitoplancton dove sono presenti specifici andamenti temporali (D'Ortenzio, 2009).

Durante l'estate, la stratificazione verticale inibisce il flusso di nutrienti verso lo strato superficiale, impedendo la crescita degli autotrofi. Al contrario, a fine Autunno-Inverno, il rimescolamento della colonna d'acqua determina il ritorno dei Sali nutritivi negli strati superficiali e permette una fioritura fitoplanctonica secondaria, poiché l'irradianza negli strati superficiali è sufficiente per supportare la crescita netta.

Il risultato delle osservazioni satellitari (D'Ortenzio, 2009) indicano che le aree con pronunciate fioriture di fitoplancton sono geograficamente localizzate: esempio nella regione Ligure-provenzale si hanno significative fioriture con estensione temporale e spaziale variabile interannualmente.

Le fioriture fitoplanctoniche sono chiaramente associate alle condizioni fisiche di circolazione, determinate in maniera significativa dal forzante ventoso, che, quando determina strutture di circolazione cicloniche innesca processi di risalita di acque profonde ricche in Sali nutritivi.

Le aree caratterizzate da significativa produzione primaria sono causate da upwelling e gyres ciclonici. Sono caratterizzate da alti valori di concentrazione di clorofilla *a* e bassi valori di SST. (Kitsiou & Topouzelis, 2014).

Nel dominio strettamente costiero inoltre aree ad elevata produzione fitoplanctonica si riscontrano in corrispondenza delle foci dei fiumi (D'Ortenzio, 2009), causati appunto dagli apporti continentali di Sali nutritivi associati allo scarico fluviale.

1.3 Eutrofizzazione

Anche se il bacino del Mediterraneo è considerato un bacino oligotrofico, nel dominio costiero, talora si verificano processi di eutrofizzazione. “L'eutrofizzazione è un arricchimento delle acque in sali nutritivi che provoca cambiamenti strutturali all'ecosistema come: l'incremento della produzione di alghe e piante acquatiche, l'impoverimento delle specie ittiche, la generale degradazione della qualità dell'acqua ed altri effetti che ne riducono e precludono l'uso”. Questa è una delle prime definizioni date al processo eutrofico dall'OCSE (Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico, si veda sito in bibliografia) negli anni '70.

L'eutrofizzazione costituisce un serio problema ecologico in quanto determina un deterioramento della qualità delle acque e rappresenta uno dei maggiori impedimenti al raggiungimento degli obiettivi di qualità stabiliti dalla Direttiva Quadro sulle Acque (2000/60/CE) a livello europeo (www.minambiente.it/direttive/direttive-acque).

Tutti i corpi idrici sono soggetti ad un naturale e lento processo di eutrofizzazione, che negli ultimi decenni ha subito una progressione molto veloce a causa della presenza dell'uomo e delle sue attività, si parla infatti di eutrofizzazione culturale. Il processo di eutrofizzazione culturale consiste in un continuo aumento dell'apporto di sostanze nutritive, principalmente Azoto e Fosforo, fino a superare la capacità ricettiva del corpo idrico (ovvero la capacità di un lago, fiume o mare di auto-depurarsi), innescando cambiamenti strutturali nelle acque.

Questi cambiamenti strutturali dipendono principalmente da tre fattori:

1. Scarico di acque reflue nei corpi idrici: in diverse parti del mondo, e in particolare nei Paesi in via di sviluppo, le acque reflue vengono direttamente scaricate in corpi idrici quali fiumi, laghi e mari. Il risultato di ciò è il rilascio di un'elevata quantità di nutrienti che stimola la crescita spropositata di alghe;
2. Uso di fertilizzanti: le pratiche agricole e l'uso dei fertilizzanti nel suolo contribuiscono all'accumulo di nutrienti. Quando queste sostanze nutritive raggiungono alte concentrazioni e il suolo non riesce più ad assimilarle, vengono trasportate dalle piogge nei fiumi e nelle acque sotterranee che confluiscono nei laghi o nei mari;
3. Riduzione della capacità auto depurativa: con il passare degli anni i laghi accumulano grandi quantitativi di materiale solido trasportato dalle acque (i sedimenti). Questi sedimenti hanno caratteristiche tali da poter adsorbire grandi quantità di nutrienti e di inquinanti. L'accumulo dei sedimenti favorisce la risospensione delle sostanze nutritive presenti sul fondo del Bacino.

L'eutrofizzazione è caratterizzata da un aumento notevole delle alghe dovuto alla maggiore disponibilità di uno o più fattori di crescita necessari per la fotosintesi, come la luce solare, Anidride Carbonica e i nutrienti (Azoto e Fosforo). Quando le alghe iniziano a crescere in modo incontrollato si forma una biomassa sempre più consistente destinata a degradarsi. Nelle acque profonde si accumula una grande quantità di sostanza organica rappresentata dalle alghe giunte alla fine del loro ciclo di vita, (figura 3). Per demolire tutte le alghe morte è richiesto un consumo eccessivo di Ossigeno, in alcuni casi quasi totale da parte dei microrganismi. Si crea così un ambiente anossico sul fondo del lago, con la crescita di organismi capaci di vivere in assenza di Ossigeno (anaerobi), responsabili della degradazione della biomassa. I microrganismi, decomponendo la sostanza organica in assenza di Ossigeno, liberano composti che sono tossici, quali ad esempio l'Ammoniaca

(NH_3) e l'Acido Solfidrico (H_2S). L'assenza di Ossigeno riduce la biodiversità determinando in alcuni casi addirittura la morte di specie animali e vegetali. Tutto ciò accade quando la velocità di degradazione delle alghe da parte dei microrganismi è maggiore rispetto a quella di rigenerazione dell'Ossigeno, che nei periodi estivi è già presente in concentrazioni basse.

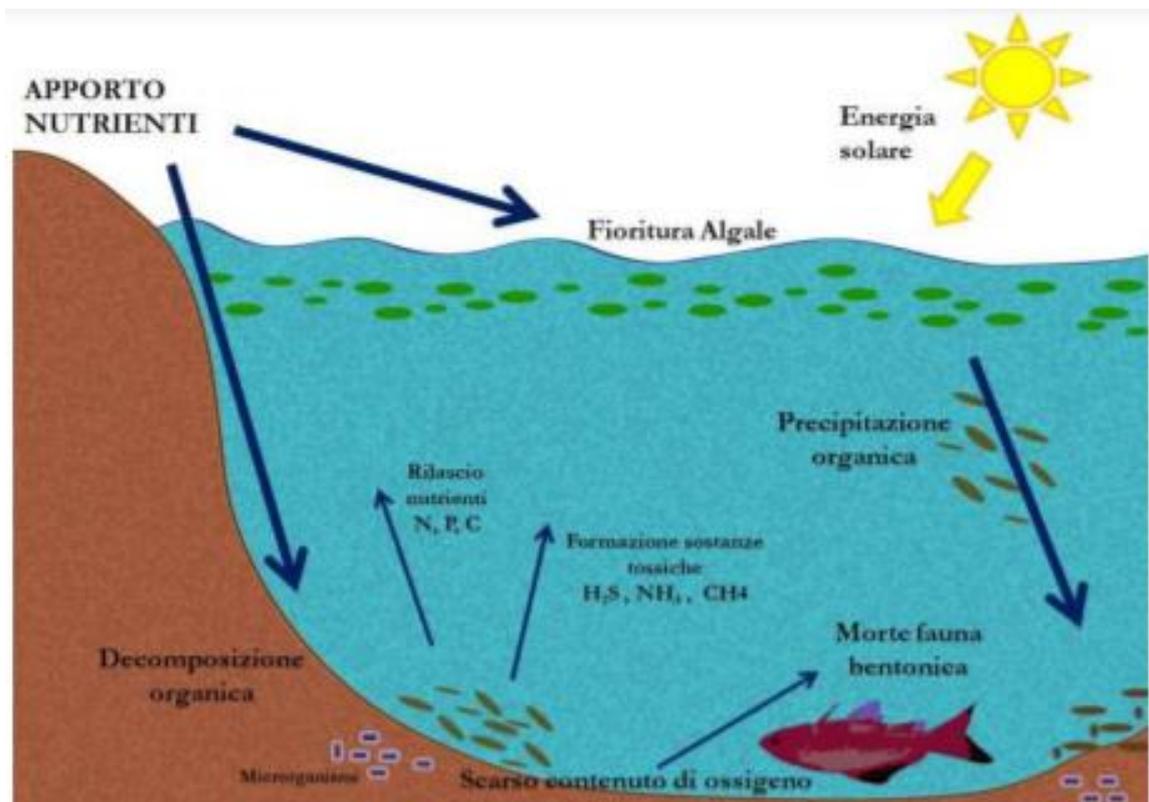


Figura 3 - Rappresentazione del processo di eutrofizzazione (Rielaborazione Feem da Arpa Umbria, 2009, <https://www.arpa.umbria.it/>).

1.3.1 Effetti dell'eutrofizzazione

La perturbazione degli equilibri acquatici può essere più o meno evidente in base all'arricchimento delle acque in nutrienti (Fosforo e Azoto) ma sicuramente l'eutrofizzazione costituisce una delle principali minacce per la biodiversità delle acque marine costiere e come conseguenza il funzionamento dell'ecosistema (Chihoub et al., 2020). Infatti, quando il fenomeno

dell'eutrofizzazione diventa particolarmente intenso, si generano effetti indesiderati e squilibri ambientali. I due fenomeni più acuti dell'eutrofizzazione sono l'ipossia, o comunque la carenza di Ossigeno nella parte profonda e le fioriture algali che possono produrre tossine nocive, che possono distruggere la vita acquatica nelle zone colpite.

Gli effetti principali dell'eutrofizzazione sono:

- L'abbondanza di sostanze particellate (fitoplancton, zooplancton, batteri, funghi e detriti) che determinano l'intorbidimento e la colorazione delle acque;
- L'abbondanza di composti chimici inorganici esempio Ammoniaca, nitriti, Acido Solfidrico;
- L'abbondanza di sostanze organiche che impartiscono odori e sapori sgradevoli all'acqua;
- La forte diminuzione di fauna marina o, nei casi più gravi la moria;
- La possibile affermazione di alghe tossiche con pericolo di danni sull'uomo e sulla fauna e flora marine;
- Divieto di balneazione con conseguenza di perdita di turismo.

1.4 Algal blooms

È bene precisare che le fioriture algali o "algal blooms" sono fenomeni naturali dovuti alla crescita esponenziale di un numero di micro-alghe appartenenti alle classi delle Diatomee, dei Dinoflagellati o di altre classi del fitoplancton che, in particolari condizioni possono raggiungere concentrazioni di milioni di cellule per litro. In molti casi non ci sono segni evidenti, ma a volte la fioritura si manifesta con:

- Colorazioni anomale dell'acqua, presenza di schiume o di muchi di colore marrone o verde in superficie o in sospensione;
- Mucillagini o pellicole brunastre sul substrato o in colonna d'acqua;
- Segni di sofferenza in organismi animali, sia sessili (esempio bivalvi, gasteropodi) che mobili (esempio echinodermi, cefalopodi, piccoli pesci);
- Morie di fauna acquatica, per lo più bentonica, per effetto dell'anossia che interessa i fondali.

La crescita delle alghe è un fenomeno naturale ciclico, tuttavia può essere incrementato e catalizzato dall'aumento delle temperature dei mari e dell'accumulo di sostanze inquinanti trasportate dai fiumi e dall'uomo.

Il fitoplancton, costituito da alghe unicellulari o coloniali presenta una grande biodiversità (Diatomee, Dinoflagellati, Coccolitoforidi) ed è considerato un eccellente indicatore dei cambiamenti dello stato trofico delle acque, poiché il verificarsi di "bloom algali", l'incremento di biomassa e cambiamenti nella composizione fitoplanctonica (come il predominio di una specie sulle altre) segnalano condizioni di stress ambientale. Le cause del fenomeno delle fioriture algali sono riconducibili a temperature particolarmente elevate delle acque di mare, che contribuiscono a sviluppare la componente fitoplanctonica, causando proliferazione algale.

Gli unici effetti negativi riguardanti l'aumento di biomassa algale possono verificarsi quando questi fenomeni sono associati a produzioni di tossine da parte delle micro-alghe interessate alla fioritura che possono essere trasmessi alla fauna ittica e all'uomo. La presenza di micro-alghe planctoniche d'interesse sanitario nell'ambiente marino costiero è soggetta ad attività di sorveglianza attraverso appositi piani di monitoraggio che prevedono l'isolamento e la caratterizzazione di alcune specie potenzialmente tossiche come per esempio *Coolia monotis*, *Fibrocapsa japonica*, *Prorocentrum lima*, *P. emarginatum*, *Amphidinium sp.*, *Dinophysis sp.* L'attenzione è rivolta soprattutto all'alga bentonica *Ostreopsis ovata* responsabile negli ultimi anni di diversi episodi tossici per i bagnanti anche in alcune regione costiere italiane (Liguria, Toscana, Sicilia e Lazio).

1.5 Obiettivo della tesi

L'obiettivo di questo elaborato è la valutazione di trend temporali di lungo periodo (20 anni), dal 1998 al 2017 nelle caratteristiche di temperatura superficiale e clorofilla superficiale rilevate remotamente da sensori satellitari. Ci si propone di evidenziare la variazione di queste due importanti proprietà dell'ambiente fisico e biogeochimico marino su una scala temporale climatologica e identificare le (se esistenti) possibili interazioni fra le variazioni delle due proprietà.

La tesi è così strutturata:

- Capitolo 1: descrizione del Mediterraneo, la fisica e la circolazione, da che correnti è guidato e le circolazioni che lo governano, che tipo di Bacino è, la produzione primaria e la clorofilla, quali problemi riscontra nelle sue acque soprattutto sulla costa, l'eutrofizzazione.
- Capitolo 2: in questo capitolo sono descritti i materiali e i metodi che si sono utilizzati per questo elaborato, i dati satellitari di temperatura e clorofilla superficiale, le misure remote della clorofilla superficiale e della temperatura superficiale. I dati utilizzati per questa tesi, facendo il download dal sito di Copernicus, il controllo della pulizia dei dati di clorofilla.
- Capitolo 3: i risultati ottenuti generando mappe dal software di Matlab, di climatologie annuali e stagionali sia della temperatura superficiale che della clorofilla superficiale, la serie temporale con media mobile per entrambe le variabili e i trend temporali di variazione calcolati sia annualmente sia sulla stagione invernale, da Gennaio a Marzo dell'intero Bacino ma anche di tre zone specifiche del Mediterraneo, la NW, la regione Adriatica e la regione del Mediterraneo Orientale.
- Capitolo 4: conclusioni dell'elaborato.

CAPITOLO 2 MATERIALI E METODI

2.1 Misure remote della temperatura e della concentrazione di clorofilla superficiale dell'Oceano

Le osservazioni satellitari della superficie del mare sono in grado di fornire informazioni aggiornate quasi in tempo reale e in maniera sinottica (Heuzé et al., 2017).

La temperatura della superficie del mare (SST) remotamente osservata da un sensore posto su un satellite è una proprietà oceanografica chiave per varie applicazioni operative e scientifiche. Infatti, le osservazioni satellitari da radiometri a infrarossi e/o microonde possono fornire misurazioni di temperatura accurate e sistematiche ad alta risoluzione spaziale (scala spaziale di circa 1 km) e frequenza temporale, (scala temporale giornaliera). Per questi motivi, la SST rilevata a distanza viene ampiamente utilizzata per limitare e inizializzare i sistemi previsionali sia meteorologici che oceanografici. Lo strumento “Advanced Very High Resolution Radiometer” (AVHRR) è un sensore spaziale che misura la radianza emessa dalla superficie terrestre della Terra in cinque bande spettrali che coprono le lunghezze d’onda del rosso e del vicino infrarosso. I sensori AVHRR volano su satelliti ad orbita polare gestiti dalla Statunitense NOAA e dalla Europea ESA. Lo strumento esegue la scansione di più canali; due sono centrati sulle regioni rosse (0.6 micrometri) e uno sul vicino infrarosso (0.9 micrometri). Le serie temporali di dati AVHRR sono disponibili attraverso il progetto “Pathfinder”: è un progetto congiunto NASA / NOAA dedicato alla produzione di mappe giornaliere di SST globale con una risoluzione spaziale di 4 km a partire dal 1985, (Pisano et al., 2016).

Per quanto riguarda il Mar Mediterraneo la serie temporale di osservazioni satellitari di SST di Pathfinder v.5.2 sono state utilizzate per costruire mappe giornaliere accurate ed omogenee. Le aree prive di dati, dovute alla copertura nuvolosa che impedisce il rilevamento satellitare della SST sono state ricostruite attraverso un procedimento statistico di interpolazione (analisi oggettiva). La procedura di osservazione remota e di analisi dei dati satellitari è tuttora in corso nell'ambito del servizio europeo di monitoraggio dell'ambiente marino Copernicus (CMEMS). L'omogeneità e la

coerenza del set di dati CMEMS REP L4 SST sono garantite dal fatto che i dati vengono raccolti sempre con lo stesso tipo di sensore e analizzati con la stessa procedura statistica. Inoltre, è stata eseguita una validazione approfondita confrontando un set di dati in situ indipendente, costruito da tutte le osservazioni in situ disponibili che coprono l'intero periodo di osservazione. La procedura di validazione rappresenta un prezioso set di dati SST per studi sul clima.

Per quanto riguarda i dati da satellite della clorofilla (CHL), i valori di concentrazione di pigmenti clorofilliani sono stati ottenuti analizzando le osservazioni satellitari con un algoritmo (Volpe et al., 2007) di stima basato sul colore della superficie oceanica. L'algoritmo utilizzato è stato costruito specificatamente per il Mar Mediterraneo, in quanto gli algoritmi standard si sono dimostrati inappropriati per il Mar Mediterraneo. Utilizzando un ampio set di dati di clorofilla, rilevata in situ, coincidenti con misurazioni ottiche, condotte in aree con diversi regimi trofici del Bacino, è stato possibile validare tale algoritmo regionale (algoritmo MEDOC 4). La procedura di validazione ha indicato che MedOC4 è l'algoritmo migliore che soddisfa il requisito di stime imparziali della clorofilla satellitare e riduce l'incertezza associata alle osservazioni.

Per questo elaborato sono stati utilizzati i dati del Mediterraneo di temperatura superficiale (SST) e clorofilla (CHL) disponibili attraverso il progetto Copernicus (<https://marine.copernicus.eu/>). È stata considerata (sia per la SST che per la CHL) la serie temporale 1998 - 2017.

I dati sono poi stati elaborati utilizzando il software di calcolo scientifico MATLAB™, vR2017b.

2.2 I dati utilizzati

Per entrambe le variabili, sia per la temperatura superficiale sia per la clorofilla sono state usate le “rianalisi”, del progetto europeo Copernicus.

Il programma europeo Copernicus di osservazione della Terra, il Servizio Marino per il Mediterraneo è gestito da un consorzio da CMCC, INGV, OGS e HCMR. INGV è responsabile della componente fisica del Mediterranean Monitoring and Forecasting Centre (Med-MFC), svolgendo sia attività di ricerca che operative, con l'obiettivo di migliorare la modellistica oceanografica e la qualità dei prodotti offerti, mettendoli a disposizione per gli utenti finali. INGV produce quotidianamente, in maniera operativa, analisi e previsioni a breve termine (10 giorni) dello stato del mare per i parametri fisici, quali temperatura, salinità correnti e fornisce anche

“rianalisi” dello stato del mare dei passati 30 e 60 anni, in grado di descrivere la variabilità della circolazione e i processi che la determinano.

Per quanto riguarda la SST si è utilizzato il prodotto fornito da Copernicus, nella sezione di “Ocean Products” “SST_MED_SST_L4_REP_OBSERVATIONS_010_021” una serie di dati satellitari di temperatura superficiale con una risoluzione di $0.4^\circ \times 0.4^\circ$ sulla griglia del Mediterraneo. Questi dati giornalieri sono stati poi trasformati in dati mensili per avere lo stesso dataset, dato che i dati di clorofilla superficiale invece erano già mensili.

Per i dati di clorofilla invece sempre dal sito di Copernicus nella sezione “Ocean Products” si è utilizzato il prodotto “Oceancolour_MED_CHL_L4_REP_OBSERVATIONS_009_078”, questi dati invece erano già su una base mensile, ad una risoluzione di $1\text{km} \times 1\text{km}$. Successivamente, è stata calcolata una climatologia su base mensile basata sulla serie temporale ventennale. Successivamente la climatologia mensile ottenuta è stata utilizzata per il calcolo delle anomalie annuali e stagionali della temperatura e della clorofilla superficiale dell'intero bacino del Mediterraneo.

2.3 Controllo di qualità dei dati di concentrazione di clorofilla superficiale

Si è dovuto svolgere un controllo della qualità dei dati di clorofilla rilevati dal satellite, in particolare il controllo si è concentrato sui dati corrispondenti alle aree costiere, dove è noto che i dati rilevati remotamente soffrono di una incertezza elevata riportando spesso valori di clorofilla elevati e non realistici. Pertanto si è proceduto ad eliminare dei campi delle osservazioni satellitari di clorofilla, valori di concentrazione superiori ad una soglia di 10, 20, 30 mg/m^3 , dal confronto dei risultati ottenuti da queste tre prove di eliminazione di dati “incerti” è emerso che la migliore rappresentazione dei campi superficiali di clorofilla era quella ottenuta con l'eliminazione di tutti i valori di concentrazione superiori alla soglia dei $10 \text{ mg}/\text{m}^3$. Tutte le analisi e le considerazioni fatte sono quindi basate sui dati ottenuti dopo questo controllo di qualità.

Si sono calcolate un tot. di deviazioni standard, la deviazione standard è una funzione che indica quanto i valori si discostano dalla media. Un valore alto di deviazione standard indica che quel valore è soggetto a differenze rispetto alla media, al contrario un valore basso indica scarse differenze annuali rispetto alla media.

CAPITOLO 3 RISULTATI E DISCUSSIONE

3.1 Climatologia annuale della temperatura superficiale

Nella figura 4 è riportata la climatologia annuale della temperatura superficiale calcolata utilizzando la serie temporale ventennale. Si nota come le temperature siano comprese tra valori dai 18°C ai 22°C con gradienti positivi sia zonali (da Ovest verso Est) che meridionali (da Nord verso Sud). Tale variazione dipende dalle interazioni fra superficie marina e atmosfera (flusso di calore) che in dipendenza dalla localizzazione “sub tropicale” del Bacino, determina appunto tale distribuzione della temperatura superficiale.

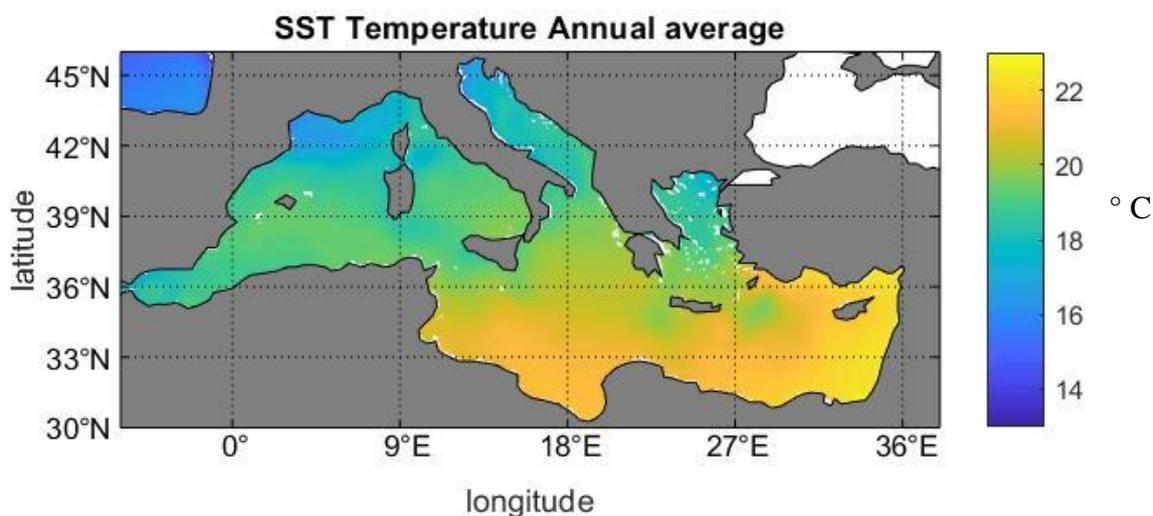
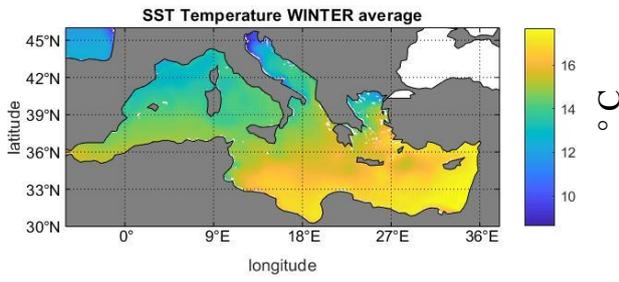


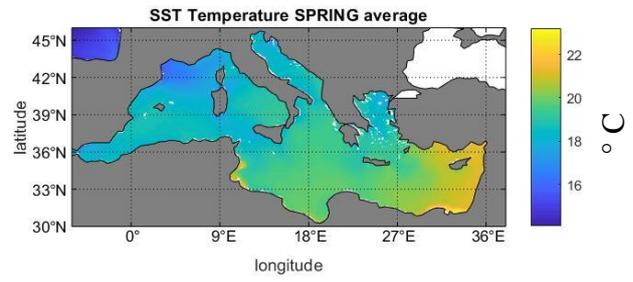
Figura 4 - Climatologia annuale della temperatura superficiale in °C del Mediterraneo (1998 - 2017).

3.2 Climatologia stagionale della temperatura superficiale

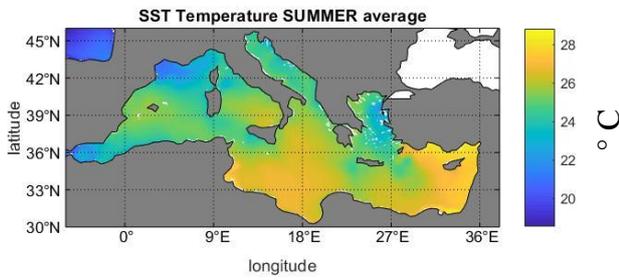
La figura 5 riporta la climatologia stagionale della temperatura superficiale. È possibile notare come in Inverno lungo la costa Adriatica si abbia una temperatura compresa fra 10°C ai 12°C, mentre per la parte Ovest del Bacino una temperatura tra i 12°C e i 14°C. Per la parte Est invece temperature maggiori incentrate dai 14°C fino oltre ai 16°C. In Primavera si hanno valori diversi in quanto nella parte Ovest del Bacino si hanno temperature con valori dai 16°C ai 20°C ad eccezione della Costa Tunisina in cui si hanno valori di circa 22°C. Mentre nella parte Est del Bacino si hanno valori dai 18°C ai 20°C eccetto la costa Egiziana in cui si hanno valori dai 20°C fino ai 22°C. In Estate invece si nota una temperatura che oscilla dai 24°C ai 26°C nella parte Ovest del Bacino ad eccezione del Mar Tirreno in cui si hanno circa 27°C, nello Stretto di Gibilterra e nel Golfo del Leone invece si hanno temperature sui 20°C, 22°C. Nella parte Levantina del Bacino invece si hanno temperature intorno ai 26°C e 28°C soprattutto sulla costa Tunisina, Egiziana e Turca. Mentre nel Mar Egeo si hanno temperature inferiori dai 22°C ai 26°C. In autunno si ha una situazione simile alla Primavera con l'eccezione che per quanto riguarda la parte Est del Bacino si hanno temperature maggiori soprattutto dalla costa Tunisina fino a quella Egiziana e Turca con valori dai 22°C e oltre. Nella parte centrale, lontano dalla costa invece valori sui 20°C. Si nota come in ciascuna stagione i gradienti termici riportati a proposito della climatologia annuale vengano mantenuti, sebbene su valori temporalmente variabili. Si notano in particolare le basse temperature invernali che caratterizzano le regioni settentrionali del Bacino, in particolare nella regione del Golfo del Leone e nell'Adriatico (regioni dove si ha la formazione invernale di acque dense e profonde) e le elevate temperature superficiali nel bacino di Levante, dove però si nota in tutte le stagioni una temperatura relativamente più bassa nella regione a sud dell'Isola di Rodi dove si verifica la formazione delle acque Mediterranee intermedie.



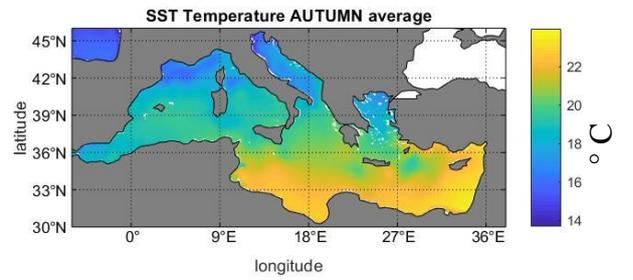
a



b



c



d

Figura 5 – Climatologie stagionali della temperatura superficiale in °C, del Mediterraneo (1998 - 2017). La scala dei colori varia da stagione a stagione. La mappa 8 a rappresenta l’Inverno, la 8 b la Primavera, la 8 c l’Estate, la 8 d l’Autunno.

3.3 Climatologia annuale della Clorofilla superficiale

La figura 6 riporta la climatologia della clorofilla superficiale per tutto il bacino del Mediterraneo. Calcolata sulla intera serie temporale ventennale. I massimi valori di clorofilla sono localizzati lungo le coste, in particolare lungo la costa del Mare Adriatico, Golfo del Leone, lungo la costa Tunisina e lungo la costa Egiziana. Le concentrazioni elevate nelle regioni costiere interessate da significativi apporti fluviali (Nord Adriatico, costa Adriatica occidentale, Golfo del Leone, delta del Nilo), indicano chiaramente che la elevata produttività primaria di queste zone è sostenuta dagli apporti continentali di Sali nutritivi attraverso gli apporti fluviali (anche di origine antropica). Queste aree sono state spesso soggette a processi di eutrofizzazione. Le aree di mare aperto sono invece caratterizzate da ridottissime concentrazioni superficiali di clorofilla, che testimoniano la natura oligotrofica del Bacino.

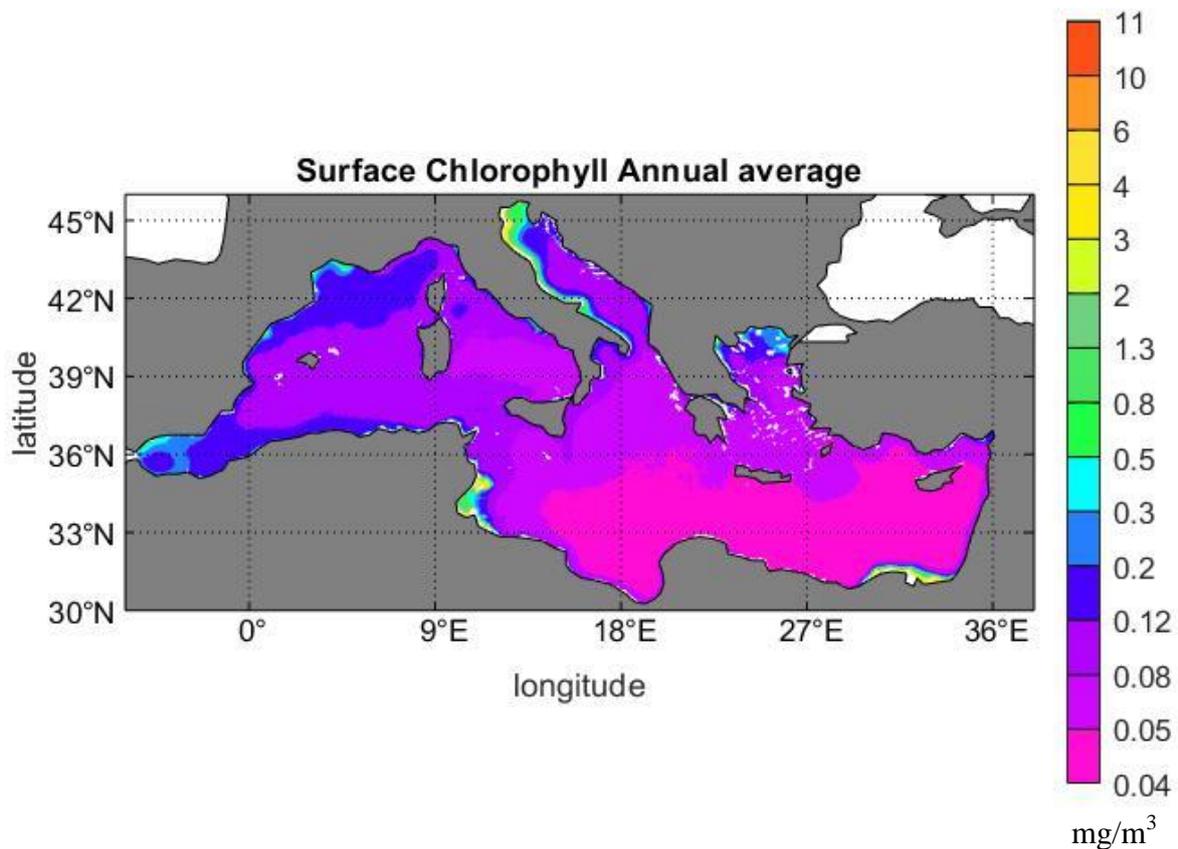


Figura 6 - Climatologia annuale della concentrazione superficiale di clorofilla superficiale misurata in mg/m³, (1998 - 2017).

3.4 Climatologia stagionale della clorofilla superficiale

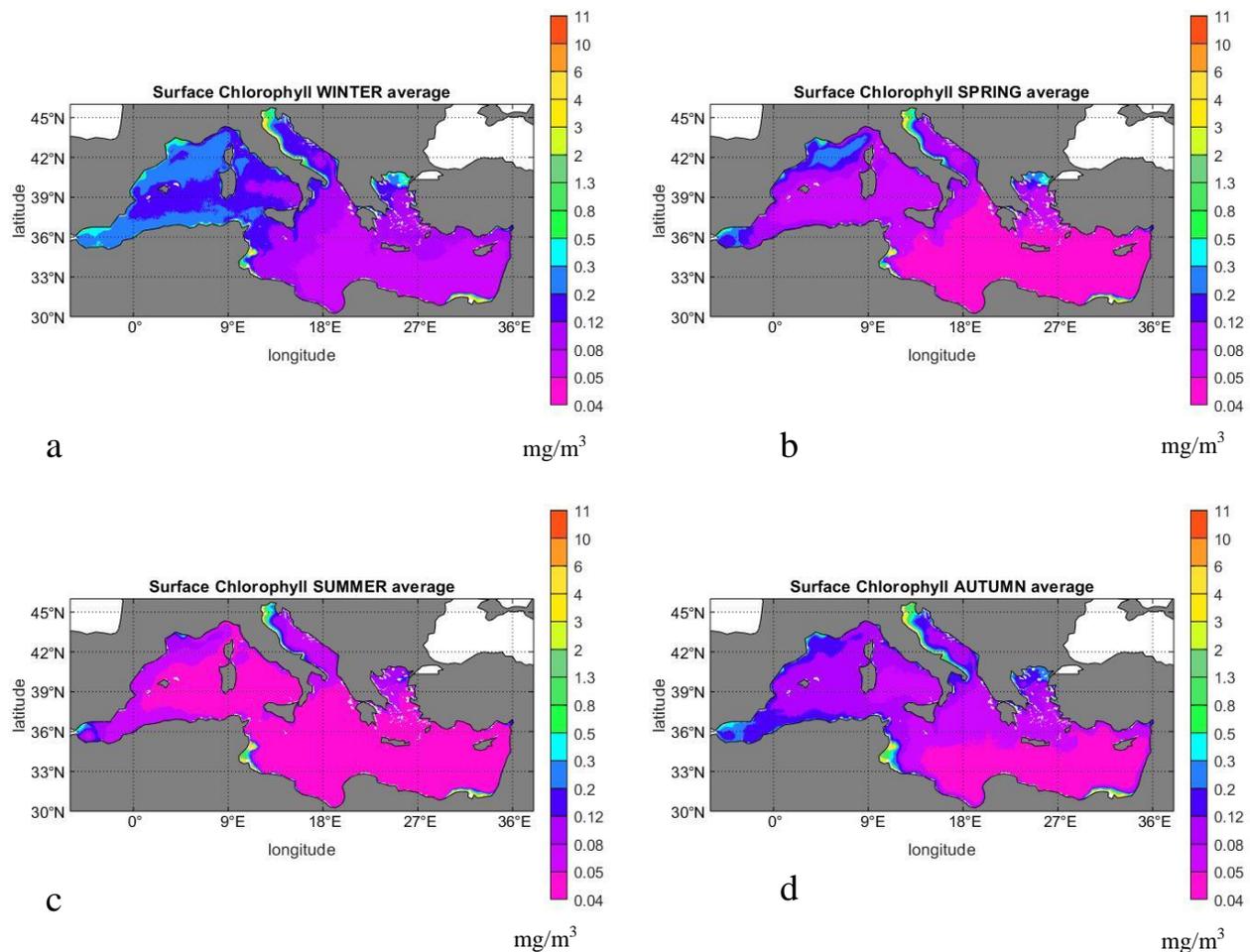


Figura 7 - Climatologie stagionali della clorofilla superficiale calcolate in mg/m³ del Mediterraneo (1998 – 2017).

La scala dei colori varia da stagione a stagione. La mappa 10 a rappresenta l’Inverno, la 10 b la Primavera, la 10 c l’Estate, la 10 d l’Autunno.

Le climatologie stagionali della concentrazione superficiale di clorofilla sono riportate in figura 7. La variazione stagionale delle concentrazioni superficiali di clorofilla indica abbastanza chiaramente che il ciclo superficiale dei produttori primari corrisponde al ciclo tipico delle medie latitudini, con valori maggiormente elevati in Inverno/Primavera (quando cioè si verifica la cosiddetta “fioritura primaverile” del fitoplancton e valori decisamente minimi nella stagione estiva, in particolare nelle regioni di mare aperto dove il verificarsi della stratificazione verticale (formazione del termocline stagionale) riduce gli apporti di Sali nutritivi dagli strati più profondi.

Le regioni costiere menzionate in precedenza, mantengono invece valori relativamente elevati per tutto il corso dell'anno a causa, appunto degli apporti continentali mediati dagli scarichi fluviali. La stagionalità è osservabile esaminando i valori tipici di ogni stagione. In Inverno si ha una concentrazione da 0.5 mg/m^3 a 6 mg/m^3 sulle coste dell'Adriatico, Egiziana, Tunisina. Mentre nel Bacino Levantino si ha una concentrazione prevalentemente con valori da 0.04 mg/m^3 a 0.12 mg/m^3 . Nel resto del Mediterraneo invece si ha una concentrazione di clorofilla superficiale con valori che oscillano da 0.12 mg/m^3 a 0.3 mg/m^3 . Per quanto riguarda la primavera si nota che sempre sulle coste dell'Adriatico, Egiziana e Tunisina si hanno valori incentrati da 0.5 mg/m^3 a 6 mg/m^3 . Mentre a livello di Bacino si ha nella parte Ovest valori da 0.05 mg/m^3 a 0.12 mg/m^3 , con eccezione della costa Francese e Spagnola, compreso lo Stretto di Gibilterra in cui si hanno valori da 0.12 mg/m^3 a 0.5 mg/m^3 . Nella parte Levantina del Bacino invece si hanno valori intorno allo 0.04 mg/m^3 . In estate invece abbiamo praticamente tutto il Bacino incentrato sui valori di 0.04 mg/m^3 eccetto nel Mar Adriatico e parte della costa Francese e Spagnola e del Mar Egeo che hanno una concentrazione di clorofilla superficiale pari ad un valore di 0.05 mg/m^3 a 0.12 mg/m^3 . Risultano valori diversi per quanto riguarda la costa dell'Adriatico, Egiziana, Tunisina in quanto si hanno valori di clorofilla che oscillano da 0.12 mg/m^3 a 6 mg/m^3 , quindi una concentrazione maggiore, mentre per lo Stretto di Gibilterra si hanno valori da 0.12 mg/m^3 a 0.8 mg/m^3 . Per quanto riguarda l'Autunno si ha una concentrazione di clorofilla superficiale analoga alla stagione primaverile, eccetto sulla costa Tunisina che si hanno valori da 0.5 mg/m^3 a 3 mg/m^3 per una zona più estesa.

3.5 Le Variazioni Ventennali

3.5.1 Serie temporale con media mobile della temperatura superficiale

Nella figura 8 è riportata la serie temporale delle anomalie mensili del valore di temperatura superficiale calcolata su base mensile per tutto il Bacino e per tutto il periodo 1998-2017. Si notano variazioni del valore di anomalia su scala stagionale ma anche su scala interannuale. Per poter evidenziare in maniera chiara le variazioni interannuali si è proceduto a calcolare le medie annuali utilizzando la procedura di calcolo di media mobile a tre anni (il valore medio annuale di ciascun anno è dato dalla media calcolata utilizzando il valore dell'anno in corso ed il valore dei due anni precedenti). La media mobile viene spesso utilizzata per l'analisi di serie temporali di lungo periodo. Si tratta in sostanza di una operazione di "filtraggio" dei dati che elimina e mantiene solo le variazioni di periodo più lungo rispetto a quelle stagionali.

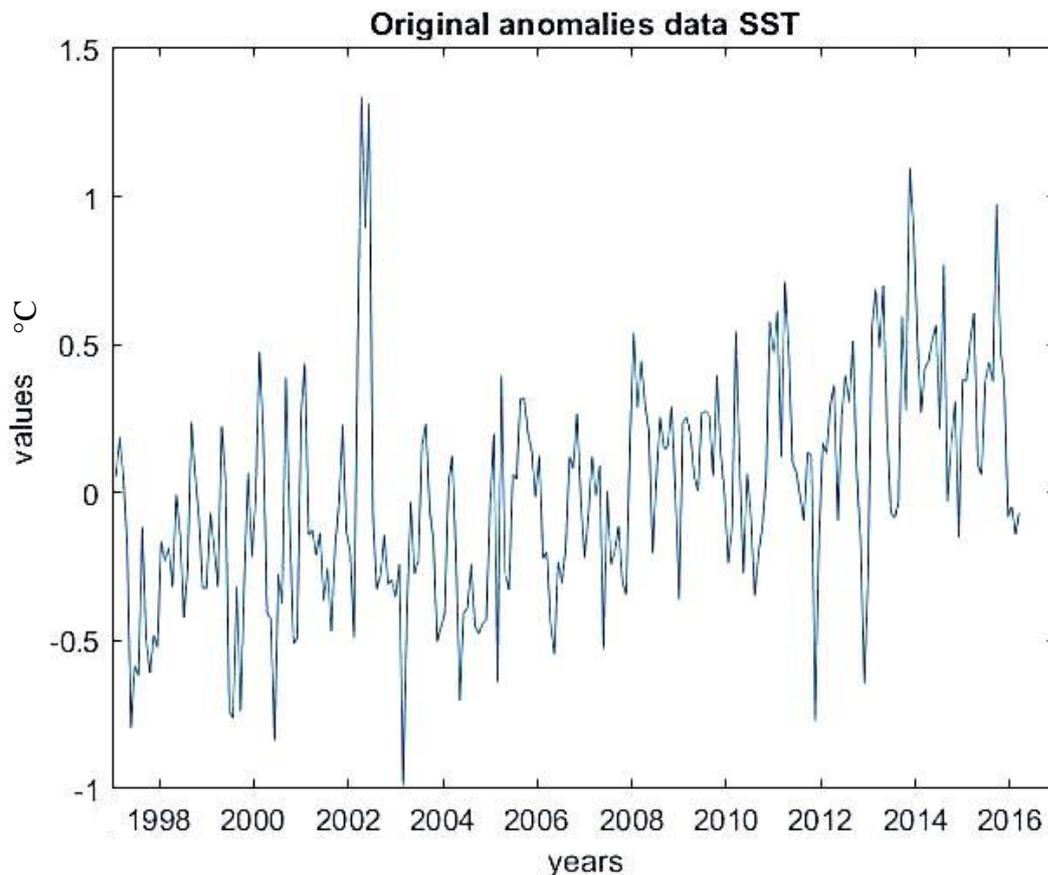


Figura 8– Serie temporale delle anomalie mensili della temperatura superficiale, calcolata in °C (1998 - 2017).

Il risultato del calcolo delle medie mobili è riportato nella figura 9. È possibile notare come il periodo che va dal 1998 al 2005 riveli un iniziale aumento del valore dell'anomalia termica, a cui fa seguito una diminuzione. Dal 2005 in poi si ha invece un sostanziale ed evidente continuo aumento del valore di SST superficiale, che indica un progressivo riscaldamento della superficie del Bacino. Le serie temporali calcolate da (Rixen et al., 2005) per il periodo 1960-2000 avevano già indicato la tendenza al riscaldamento degli strati superficiali e questa analisi sostanzialmente conferma questa generale tendenza al riscaldamento che è consistente con la generale tendenza al riscaldamento dell'Oceano globale a causa dei processi di "global warming" mediati dall'antropizzazione.

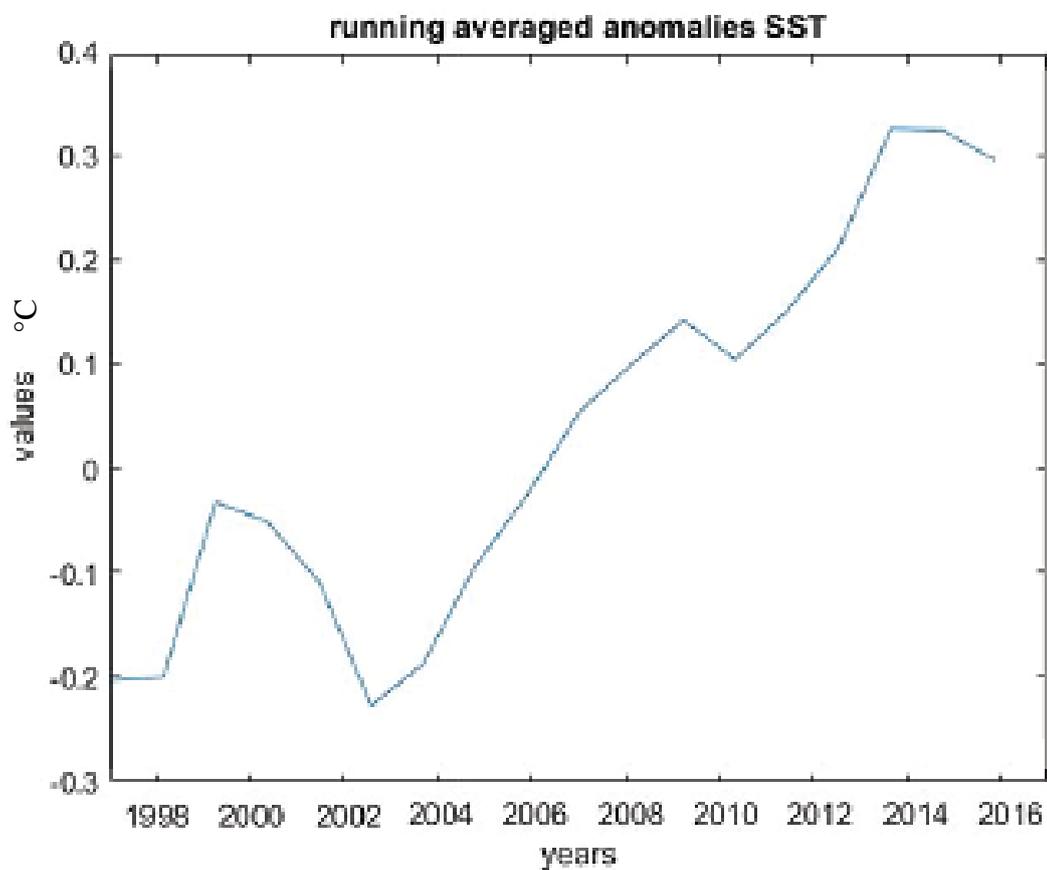


Figura 9 – Serie temporale dell'anomalia della temperatura superficiale del Mediterraneo calcolata con media mobile a tre anni, misurata in °C, (1998-2017).

3.5.2 Serie temporale con media mobile della clorofilla superficiale

Le anomalie mensili del valore di concentrazione di clorofilla superficiale calcolate per tutto il Bacino e per tutto il periodo 1998-2017 sono riportate nella figura 10. Analogamente a quanto fatto per la serie temporale delle anomalie di SST si è proceduto a calcolare la serie temporale delle medie annuali utilizzando la procedure di media mobile a tre anni.

Il risultato è riportato nella figura 11.

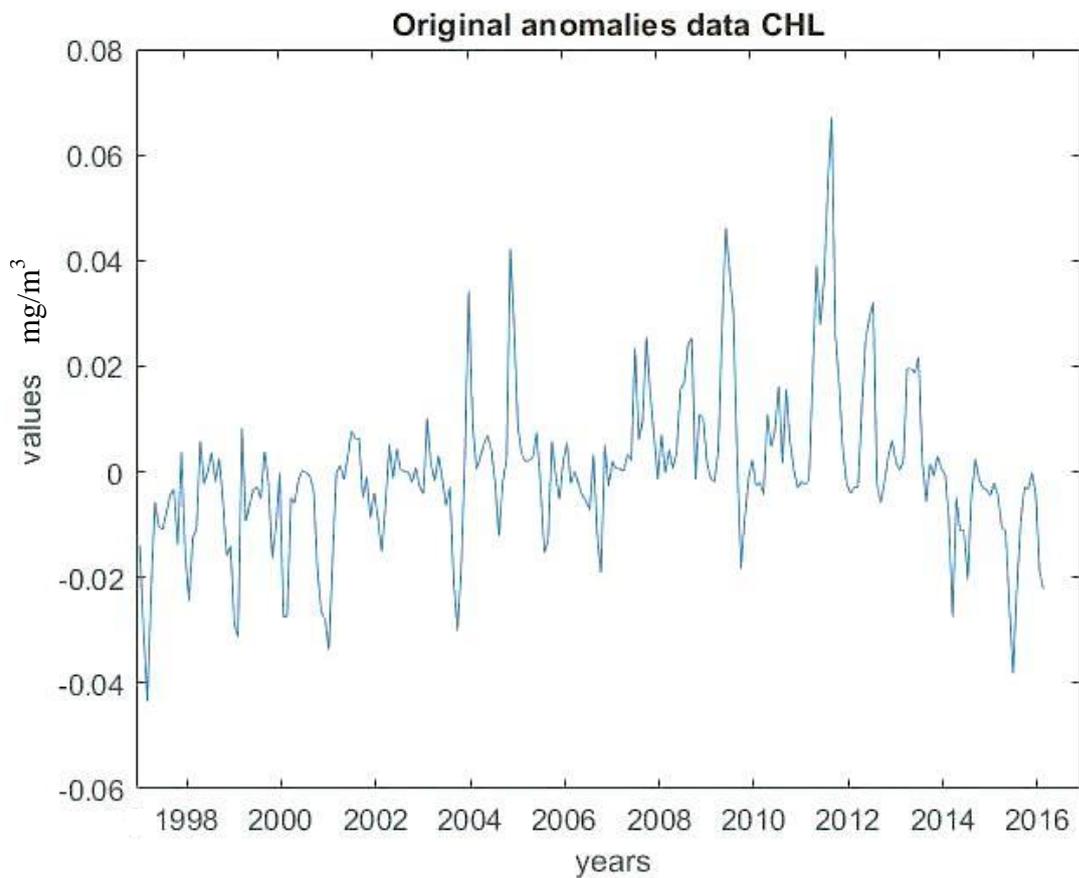


Figura 10 - Serie temporale (1998-2017) dell'anomalia della concentrazione superficiale di clorofilla in mg/m^3 .

Si può notare come la superficie del Bacino presenti una tendenza generale all'aumento delle concentrazioni di clorofilla dall'anno 2000 all'anno 2013. Mentre, a partire dal 2014 si ha una rimarchevole caduta delle concentrazioni.

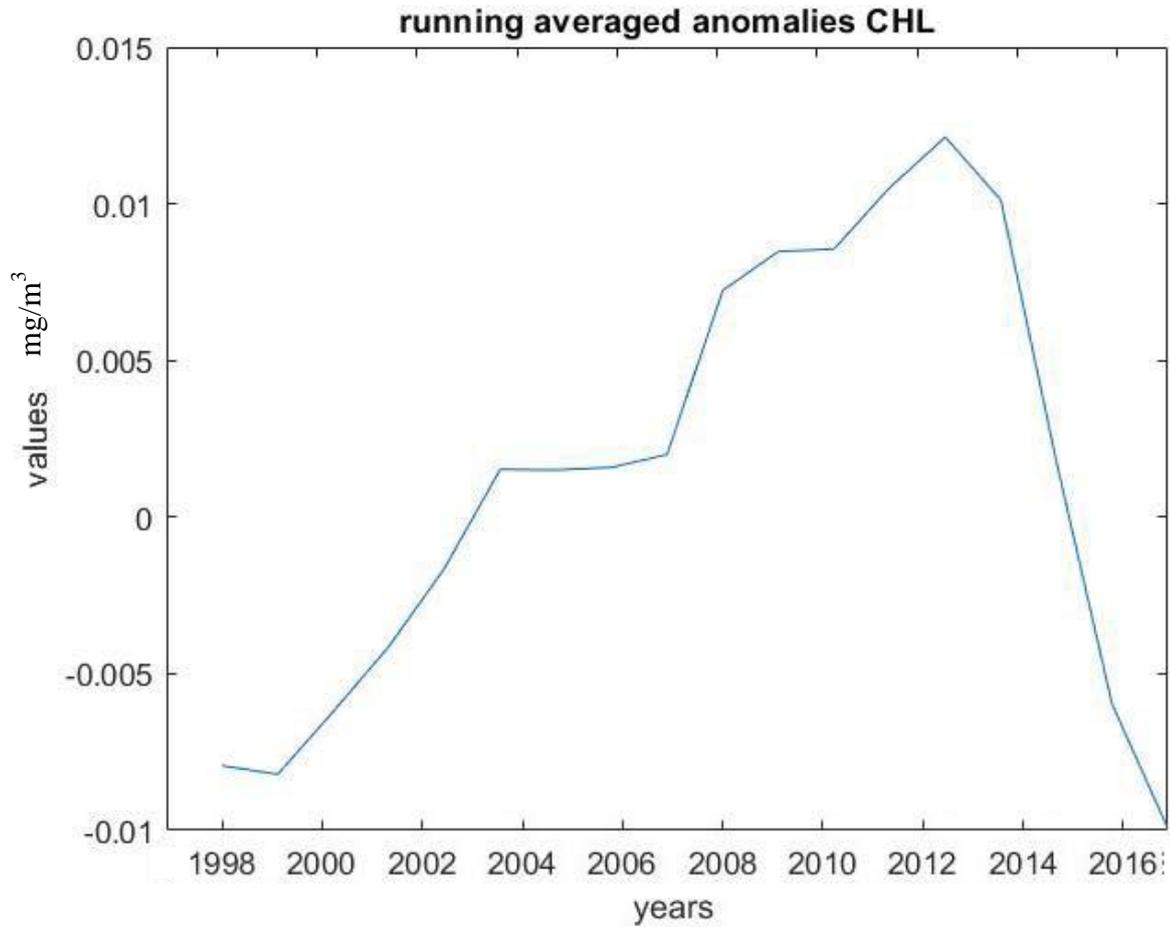


Figura 11 – Serie temporale dell'anomalia della temperatura superficiale del Mediterraneo calcolata con media mobile a tre anni, in mg/m^3 , (1998-2017).

3.6 Trend temporale di variazione della temperatura

La figura 12 riporta il tasso di variazione annuale ($^{\circ}\text{C}/\text{anno}$) della temperatura superficiale per il periodo studiato ottenuto con un procedimento di calcolo di regressione lineare. Si nota una evidentissima e generalizzata tendenza all'aumento del valore di temperatura superficiale, maggiormente accentuato a Ovest del Bacino, infatti si arriva a sfiorare un valore di $0.1^{\circ}\text{C}/\text{anno}$, più esattamente nello Stretto di Gibilterra, nella costa Algerina, zona Ligure, intorno alla Sardegna, alla Corsica e nell'alto Adriatico. Temperature leggermente più basse nella costa Egiziana. Temperature nettamente inferiori, del valore dello $0.02^{\circ}\text{C}/\text{anno}$. L'unica regione dove si osserva una tendenza alla diminuzione del valore di temperatura si osserva a Sud-Est dell'isola di Creta, dove la circolazione generale del Bacino è caratterizzata dalla presenza del gyre anticiclonico denominato "Ierapetra gyre" (IPG, si veda la fig. 2).

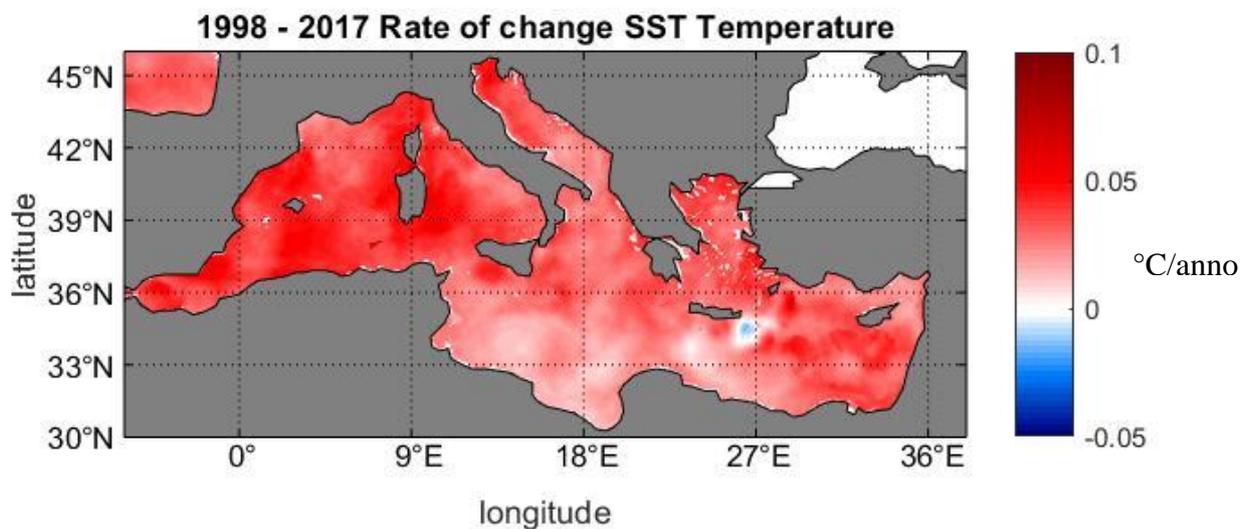


Figura 12 – Trend della temperatura superficiale del Mediterraneo (1998-2017) calcolato in $^{\circ}\text{C}/\text{anno}$.

Si è ritenuto interessante concentrare l'attenzione su alcune regioni specifiche del Mediterraneo, in particolare sulle due regioni in cui si verifica la formazione delle acque dense del bacino Mediterraneo Occidentale e Orientale, rispettivamente il Mediterraneo Nord-Occidentale (NW-Mediterranean) e Adriatico-meridionale (S-Adriatic). In aggiunta a queste due importanti aree è stata considerata la regione in cui è localizzato lo Iera Petra gyre, data la peculiare situazione del tasso temporale di variazione della temperatura.

Il tasso di variazione per la regione del NW-Mediterranean è riportato in figura 13. si nota l'evidentissima tendenza all'aumento della temperatura nella regione della piattaforma continentale (fino a 0.06 °C/anno), mentre nella regione di mare aperto la variazione temporale di temperatura appare molto limitata se non nulla. Questa regione è caratterizzata dal punto di vista della circolazione dal gyre ciclonico denominato "Gulf of Lions gyre" (GLG, si veda fig. 2). Si ricorda che la circolazione verticale all'interno di un gyre ciclonico determina la risalita verso la superficie di acque profonde fredde ricche di Sali nutritivi. L'ulteriore raffreddamento invernale determina la formazione di acque dense e profonde, mentre gli apporti verticali favoriscono (come si vedrà più avanti) lo sviluppo di fioriture fitoplanctoniche.

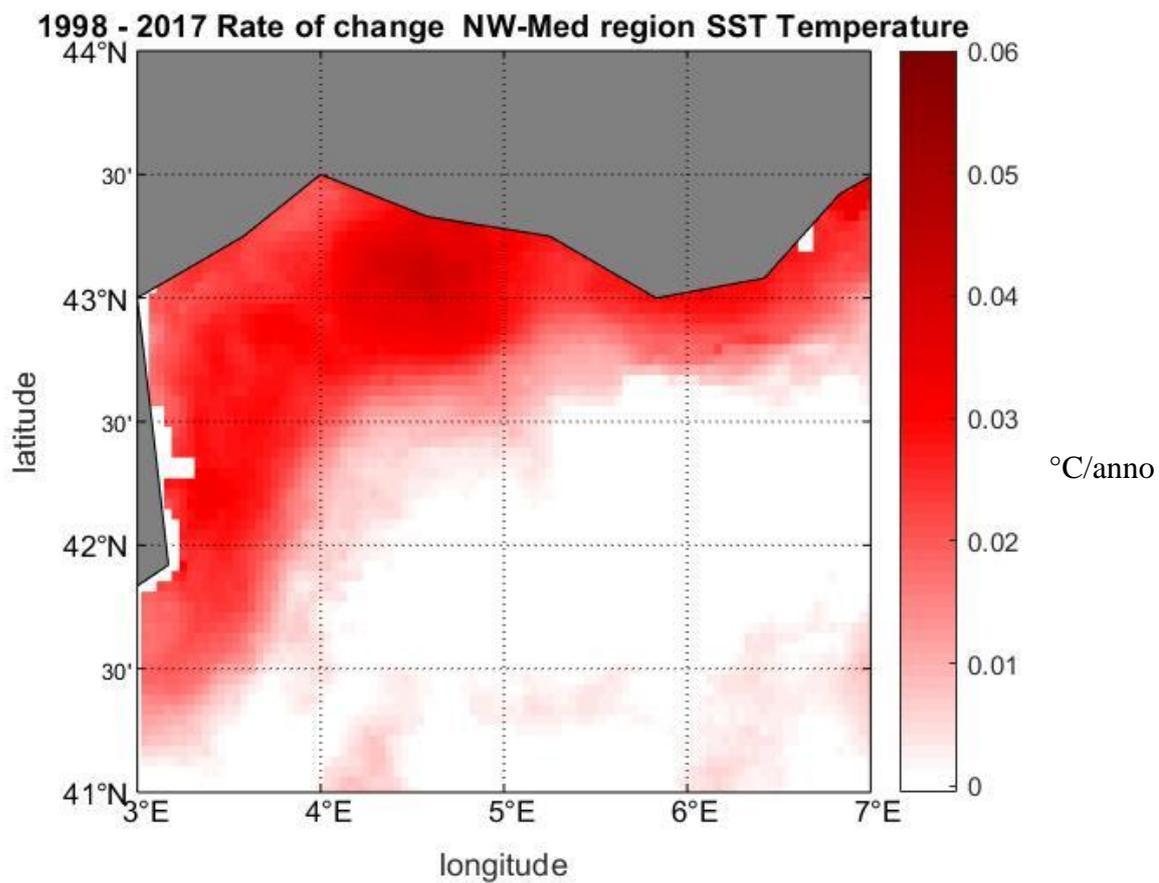


Figura 13 - Trend della temperatura superficiale calcolato in °C/anno, della regione del NW del Mediterraneo, (1998-2017).

Per poter valutare gli effetti che le variazioni temporali di lungo periodo hanno sui processi di produzione primaria si è ritenuto opportuno calcolare il tasso temporale di variazione della temperatura superficiale utilizzando solamente i dati relativi al periodo invernale (da Gennaio a Marzo) di variazione. Il risultato è riportato in Fig. 14.

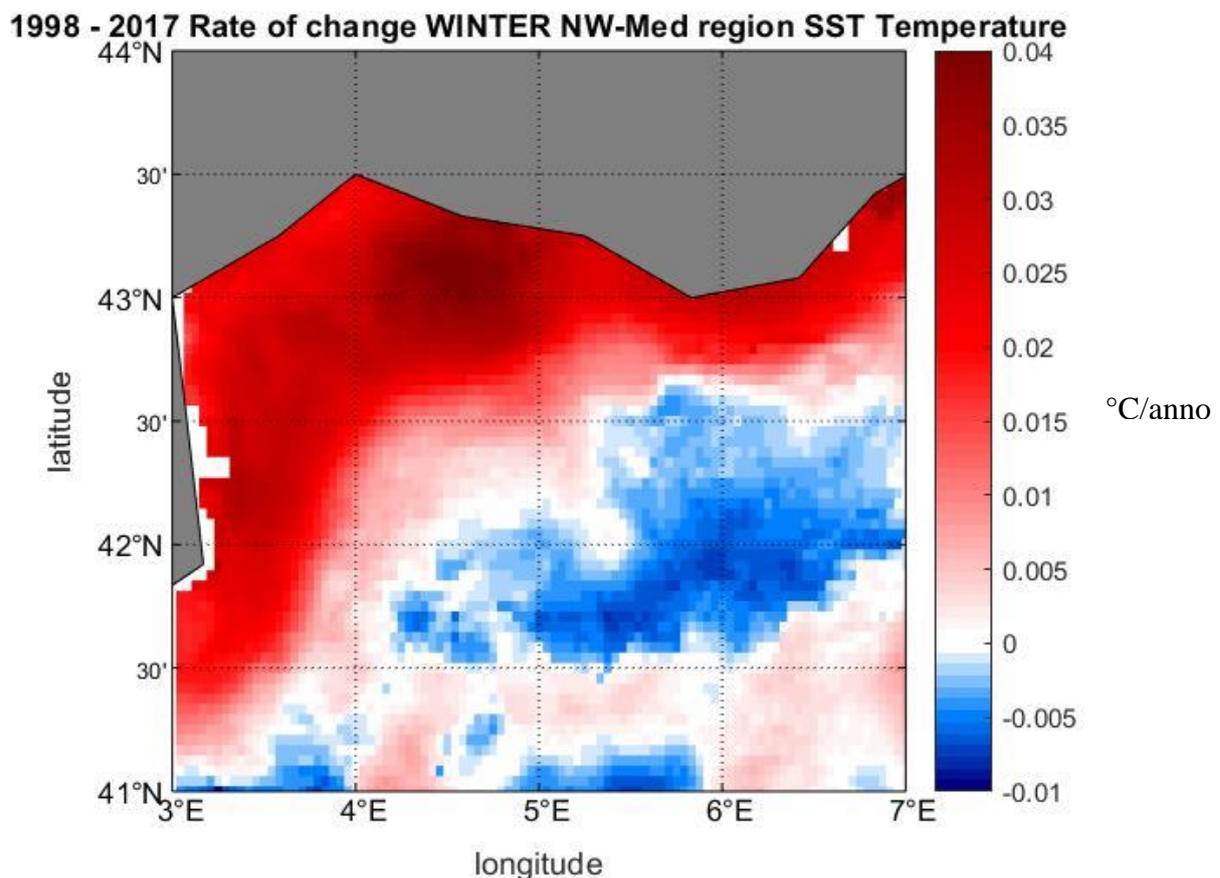


Figura 14- Trend invernale della temperatura superficiale della regione del NW del Mediterraneo (1998 - 2017), calcolata in °C/anno.

E' possibile notare come la tendenza all'aumento della temperatura permanga nelle zone di piattaforma anche durante il periodo invernale. Al contrario la regione di mare aperto, dove si posiziona il GLG mostra una tendenza (sebbene moderata) alla diminuzione temporale delle temperature. Questo fa ipotizzare una maggiore intensità dei moti verticali di risalita di acque

profonde con maggiore apporto di Sali nutritivi nella zona eufotica e quindi una possibile maggiore produzione primaria.

In figura 15, è riportata la distribuzione del tasso temporale di variazione della temperatura superficiale per la regione S-Adriatic. I valori di variazione temporale sono compresi fra 0.03° e 0.04°C/anno nelle regioni di mare aperto, mentre in prossimità della costa italiana la tendenza all'aumento delle temperature è più ridotta.

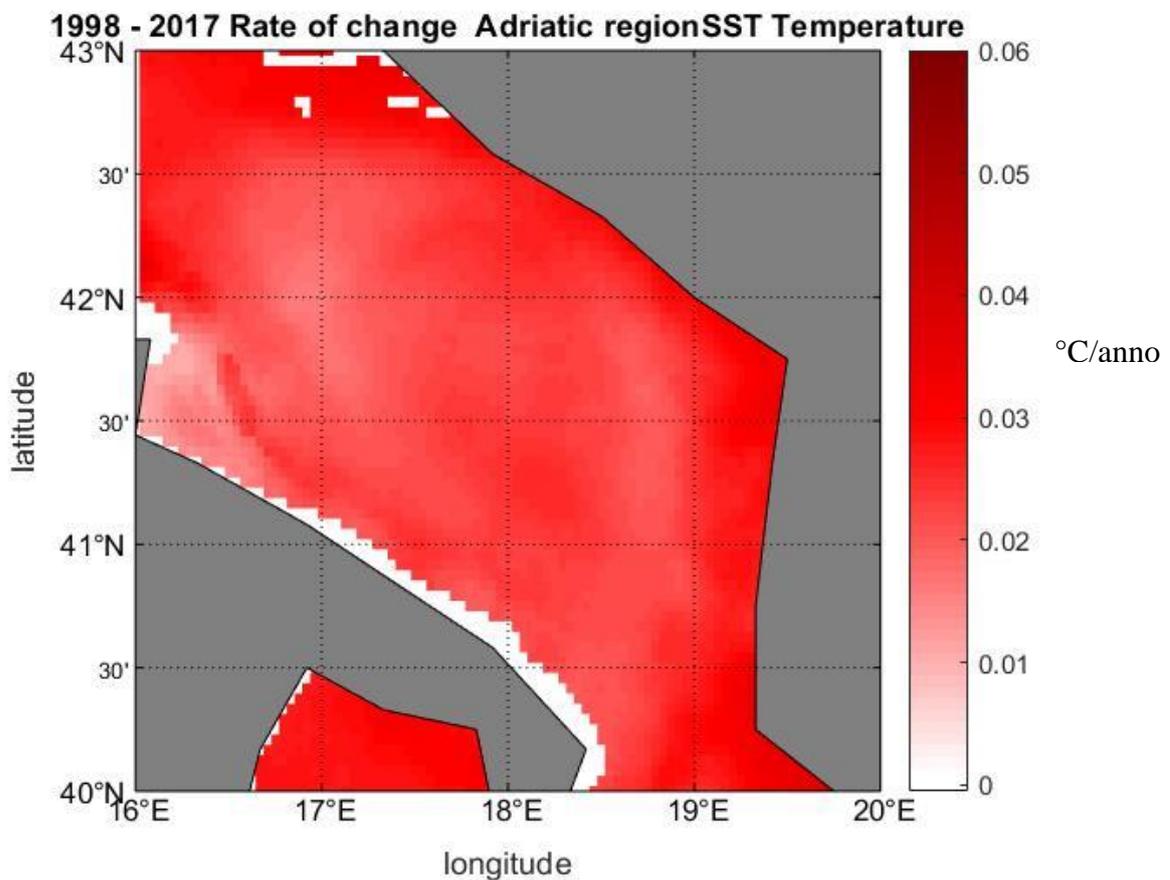


Figura 15 – Trend della temperatura superficiale della regione dell'Adriatico del Mediterraneo (1998-2017), calcolata in °C/anno.

Anche il Mar Adriatico meridionale è caratterizzato dal punto di vista della circolazione da un gyre ciclonico denominato “South Adriatic Gyre” (si veda Fig.2), con caratteristiche di circolazione verticale e formazione di acque dense analoghe a quelle brevemente descritte per il GLG. Anche in questo caso quindi si è proceduto a calcolare il tasso temporale di variazione della temperatura superficiale utilizzando solamente i dati relativi ai mesi invernali. Il risultato di questo calcolo è riportato in fig.16. Diversamente da quanto visto per il NW-Mediterranean le regioni costiere mostrano un tasso di variazione delle temperature invernali negativo, mentre le zone di mare aperto mantengono anche in Inverno la tendenza al riscaldamento. E’ possibile ipotizzare quindi una diversa interazione con i processi di produzione primaria.

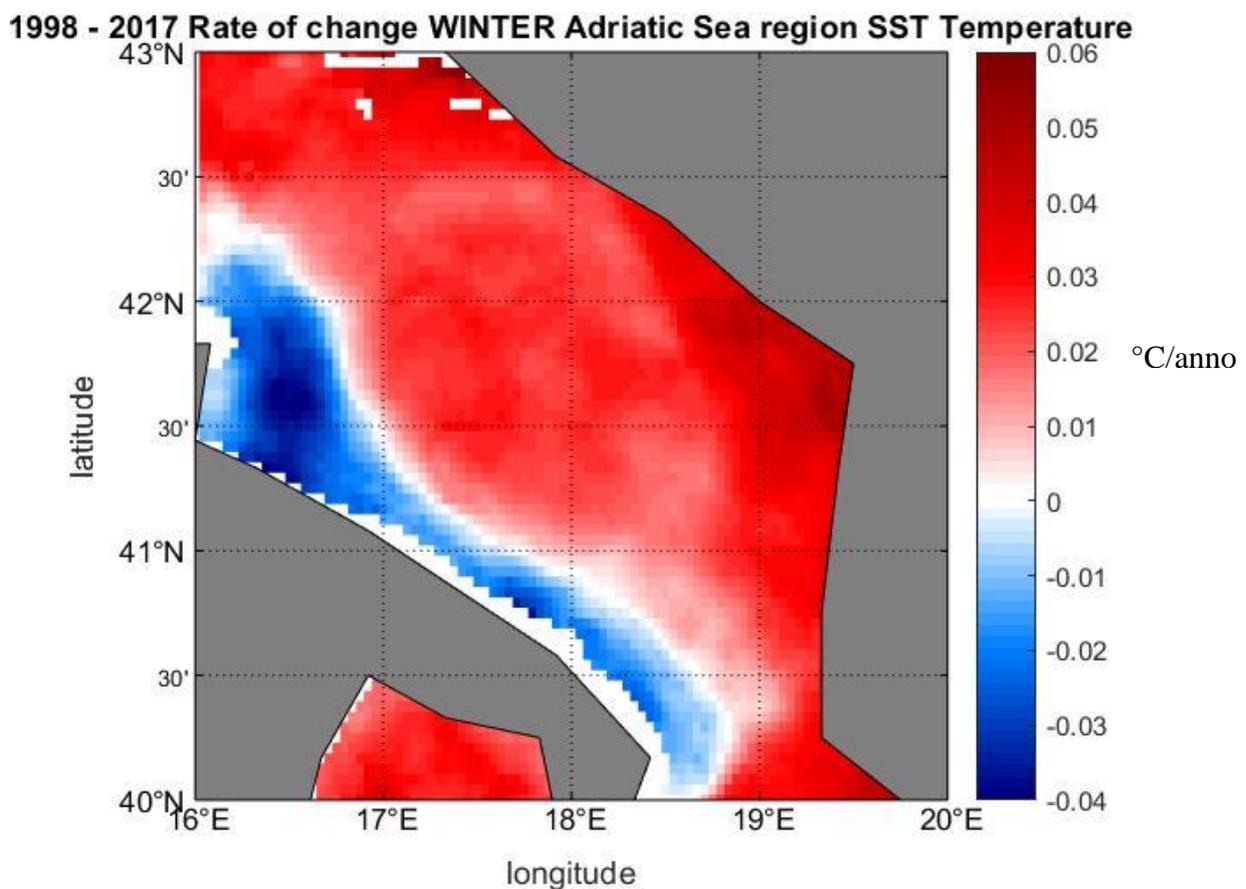


Figura 16 – Trend invernale della temperatura superficiale della regione del NW del Mediterraneo (1998 - 2017), misurata in °C/anno.

La figura 17 riporta la mappa del trend di variazione annuale della temperatura superficiale per la regione del Mediterraneo Orientale in cui è localizzato lo Ierapetra gyre. La figura evidenzia in

maniera ancora più evidente come il gyre anticiclonico Ierapetra sia l'unica struttura di circolazione che mostra un trend di variazione della SST negativo, vale a dire evidenzia una diminuzione nel tempo della temperatura superficiale. Si ricorda che la dinamica verticale di un gyre anticiclonico è opposta a quella di un gyre ciclonico, vale a dire nel centro del gyre si ha downwelling anziché upwelling e non si ha quindi apporto di acque fredde e ricche di sali nutritivi. La tendenza alla diminuzione del valore di SST è quindi ipotizzabile come dovuto ad un indebolimento nel tempo della circolazione anticiclonica. La fig. 17 mostra inoltre che a Sud-Est dell'Isola di Rodi, nella regione in cui è localizzato il gyre ciclonico denominato "Rhodes Gyre" (RG, si veda Fig.2), che è sede del processo di formazione della acque Mediterranee intermedie (si veda Fig. 17) si osserva un trend di variazione della temperatura positivo. Il progressivo aumento delle temperature al centro di un gyre ciclonico potrebbe testimoniare un indebolimento della circolazione verticale ciclonica e quindi un ridotto apporto di acque fredde profonde e ricche in Sali nutritivi, per cui sarebbe possibile una riduzione nel tempo dei processi di produzione primaria.

1998 - 2017 Rate of change Ierapetra Gyre region SST Temperature

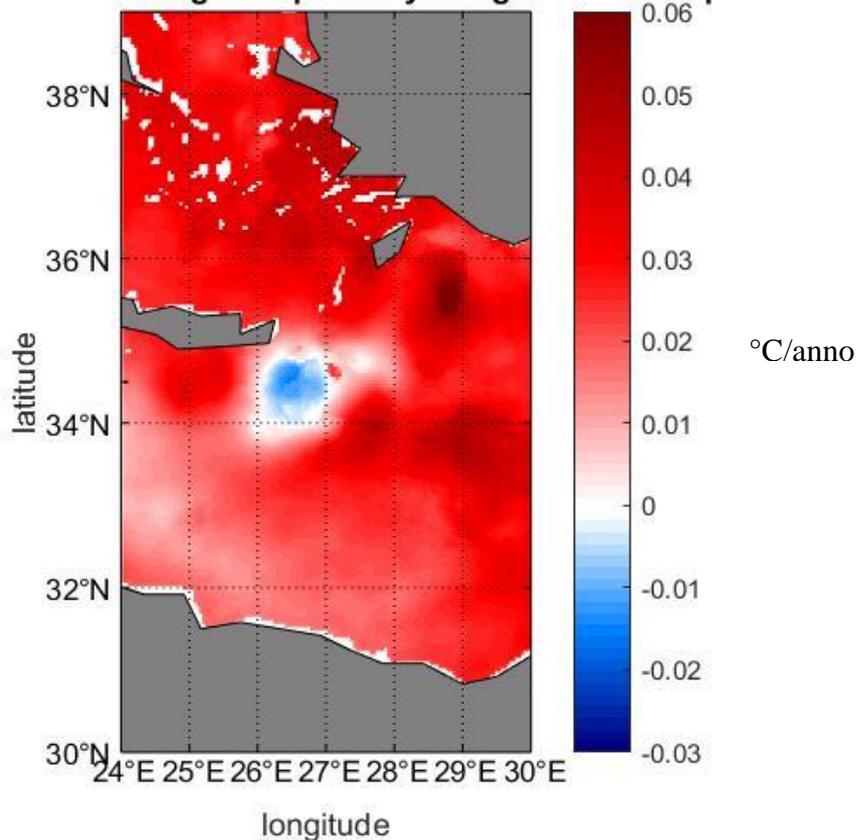


Figura 17 - Trend della temperatura superficiale della regione del gyre di Ierapetra del Mediterraneo (1998-2017), calcolato in °C/anno.

Per valutare le considerazioni fatte sopra, anche in questo caso il trend di variazione temporale della SST è stato valutato per i soli mesi invernali e il risultato è illustrato nella figura 18 che conferma il carattere permanente della tendenza alla diminuzione del valore di SST nello IeraPetra gyre. Per quanto riguarda il “Rhodes gyre” la tendenza positiva permane anche se molto ridotta rispetto al valore calcolato su base annuale. Le possibili interazioni fra variazioni temporali della SST e le variazioni di clorofilla sono esposte nel paragrafo seguente.

1998 - 2017 Rate of change WINTER Ierapetra Gyre region SST Temperature

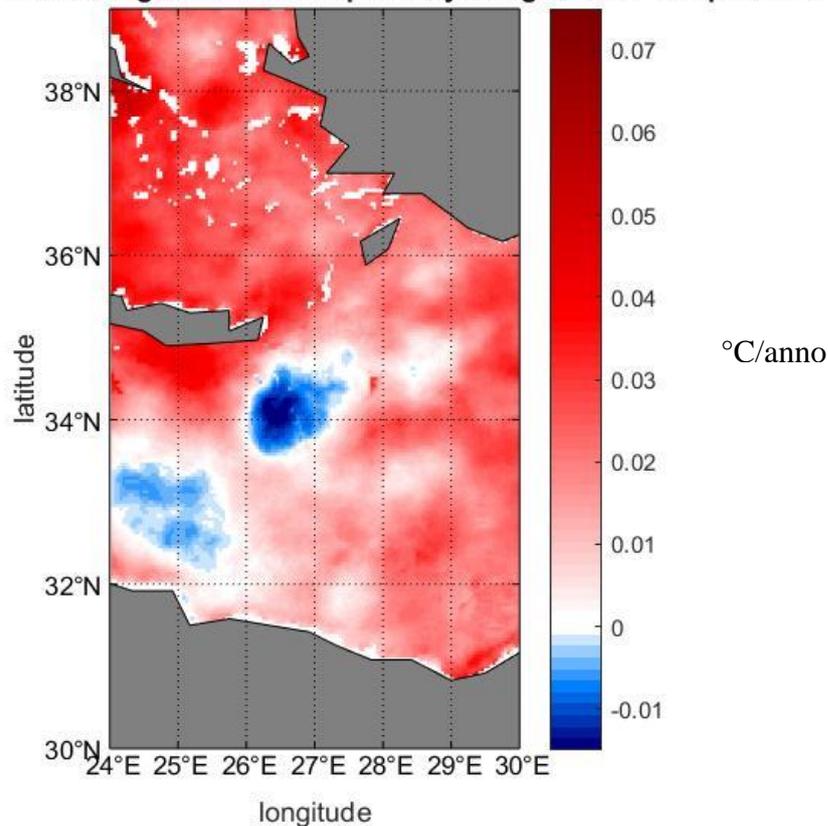


Figura 18 - Trend invernale della temperatura superficiale della regione del NW del Mediterraneo (1998-2017), calcolato in °C/anno.

3.7 Trend temporale di variazione della clorofilla superficiale

Il trend di variazione temporale della concentrazione di clorofilla (in $\text{mg m}^{-3} \text{ anno}^{-1}$) superficiale calcolato su base annuale e per tutto il bacino del Mediterraneo è riportato in Fig. 19. Diversamente da quanto visto per la variazione temporale della temperatura superficiale il campo di variazione della concentrazione di clorofilla appare assai più variegato con regioni che indicano aumenti, diminuzioni o stabilità temporali.

Sulla base di quanto descritto a proposito delle variazioni temporali della SST, l'attenzione si è concentrata sulle aree precedentemente prese in considerazione, vale a dire i gyres ciclonici del NW Mediterranean del S Adriatic e la regione in cui sono localizzati lo Ierapetra (anticiclonico) e il Rhodes (ciclonico) gyre.

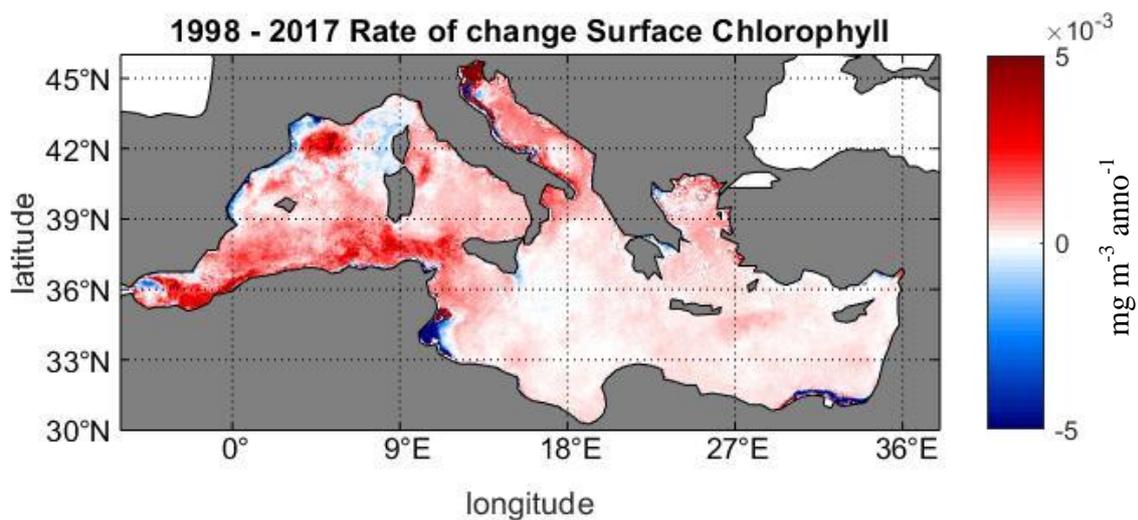


Figura 19 –Trend della clorofilla superficiale nel Mediterraneo (1998- 2017), calcolato in $\text{mg m}^{-3} \text{ anno}^{-1}$.

Per quanto riguarda il NW Mediterranean la tendenza di variazione della concentrazione di clorofilla indica, relativamente alla regione di piattaforma continentale una tendenza alla diminuzione della concentrazione di clorofilla. Questa evidenza è coerente con la tendenza all'aumento di temperatura riportato in Fig. 20, in quanto un aumento della temperatura superficiale può indicare una maggiore stratificazione verticale con inibizione (per mancanza di sali nutritivi) dei processi di produzione primaria, nonostante gli apporti fluviali (Rodano). A questo proposito si nota come i valori maggiormente negativi del trend temporale di diminuzione siano localizzati proprio in corrispondenza del Delta del fiume Rodano. Questo potrebbe indicare anche un progressivo ridotto apporto nel tempo di sali nutritivi di origine continentale. I dati utilizzati per questo lavoro non permettono purtroppo di verificare questa ipotesi.

Nella regione del GLG si nota invece una tendenza all'aumento del valore di concentrazione. Questa evidenza mal si accorda con la tendenza all'aumento delle temperature superficiali riportate nella stessa zona (si veda Fig.20). In quanto, come riportato in precedenza un aumento delle temperature superficiali potrebbe essere indicativo di un indebolimento della circolazione ciclonica, se non su base interamente annuale, almeno su base stagionale.

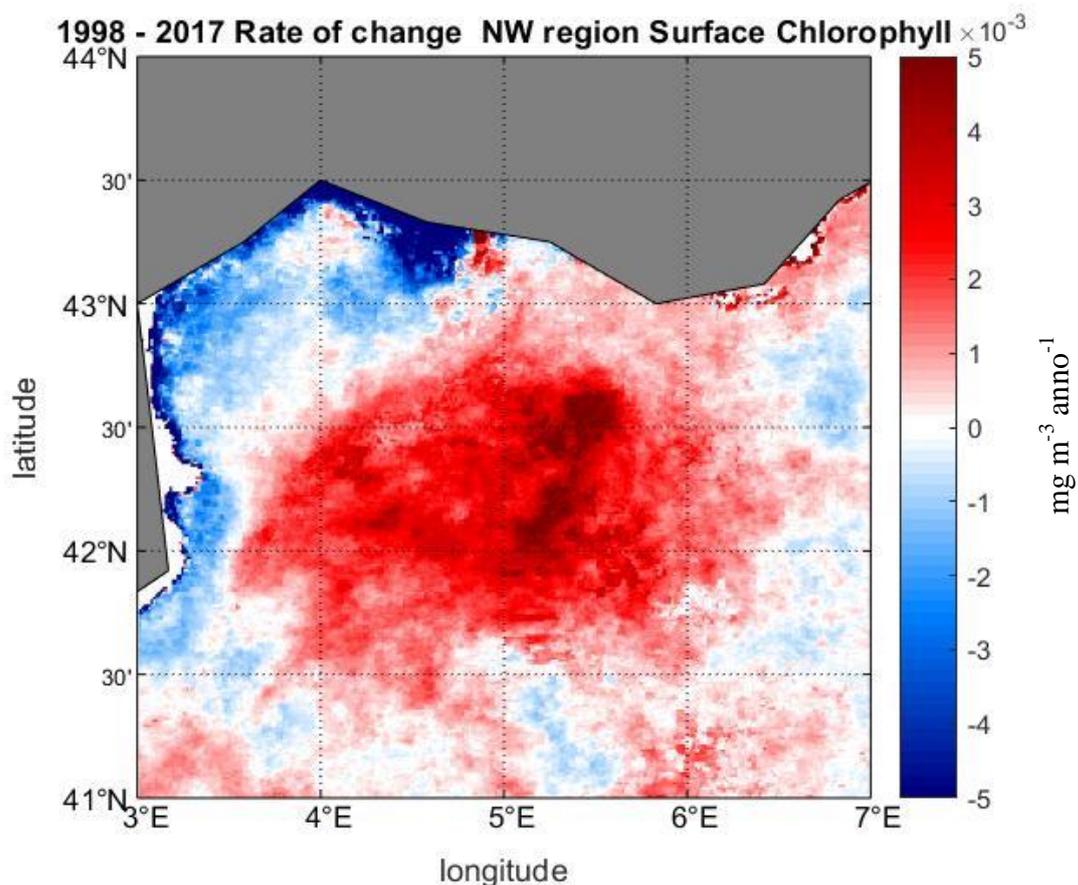


Figura 20 - Trend della clorofilla superficiale nella NW Mediterranean (1998-2017), calcolato in $\text{mg m}^{-3} \text{ anno}^{-1}$.

Valori negativi del trend di variazione di temperatura sono stati riscontrati per il GLG (si veda fig. 21) durante i mesi invernali. Per tale periodo il trend di variazione della concentrazione di clorofilla superficiale mostra, in effetti, aree di aumento nel tempo del valore di concentrazione, tuttavia alternate con aree di diminuzione. Si può comunque ipotizzare che la tendenza negativa della variazione di temperatura influisca positivamente sulla concentrazione invernale di clorofilla, ma che la dinamica delle fioriture di fitoplancton sia governata anche da altri forzanti.

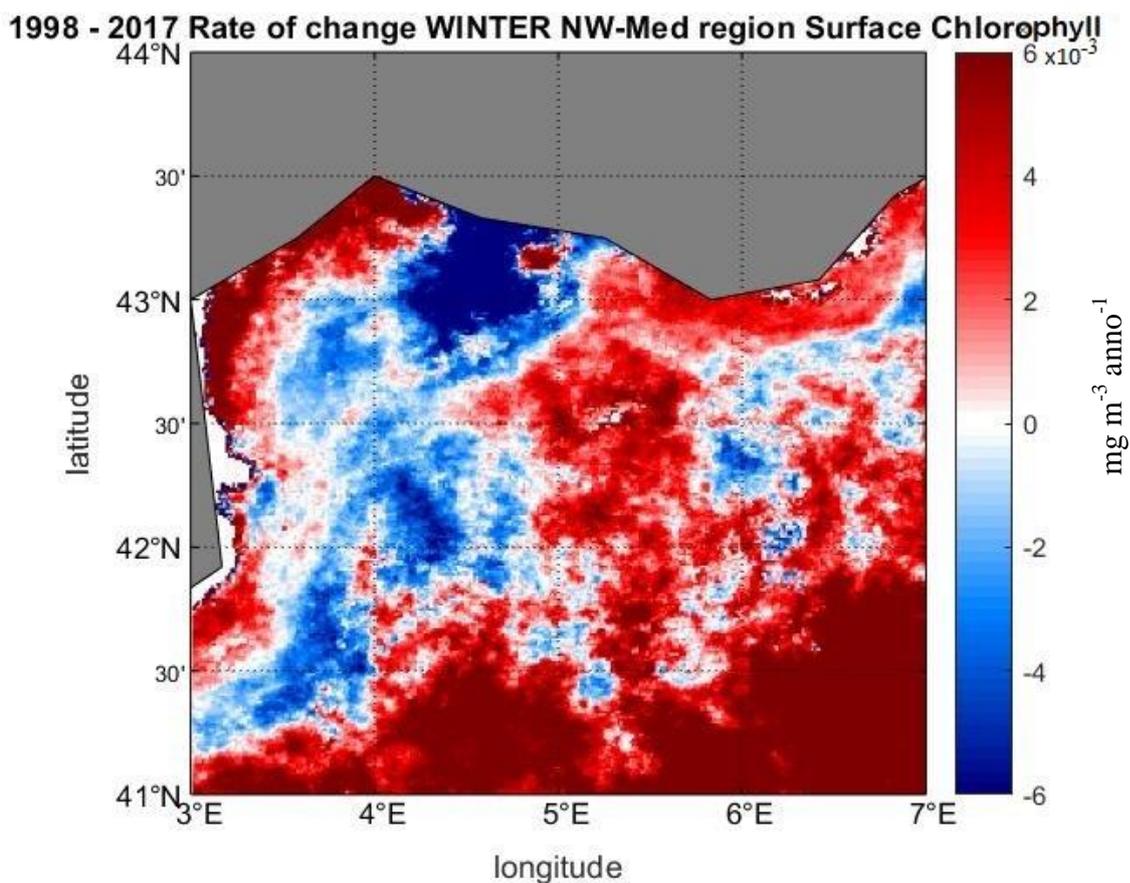


Figura 21- Trend della clorofilla superficiale della regione del Golfo del Leone, il NW del Mediterraneo, (1998 - 2017) per la stagione invernale, calcolato in $\text{mg m}^{-3} \text{ anno}^{-1}$.

Per quanto riguarda la regione dell'Adriatico meridionale, la figura 22 riporta il trend di variazione temporale della concentrazione superficiale di clorofilla ($\text{mg m}^{-3} \text{ anno}^{-1}$) calcolata su base annuale. La figura indica che il Mar Adriatico meridionale è caratterizzato dal punto di vista della circolazione da un gyre ciclonico denominato "South Adriatic Gyre" (si veda Fig.2), e qui presenta un trend di variazione temporale della concentrazione di clorofilla di valori bassi, tra 0 e $0.2 \text{ mg m}^{-3} \text{ anno}^{-1}$. Particolare attenzione per le coste, quella Pugliese e quella Albanese, in cui si concentrano valori bassi, fino a toccare i $-1 \text{ mg m}^{-3} \text{ anno}^{-1}$.

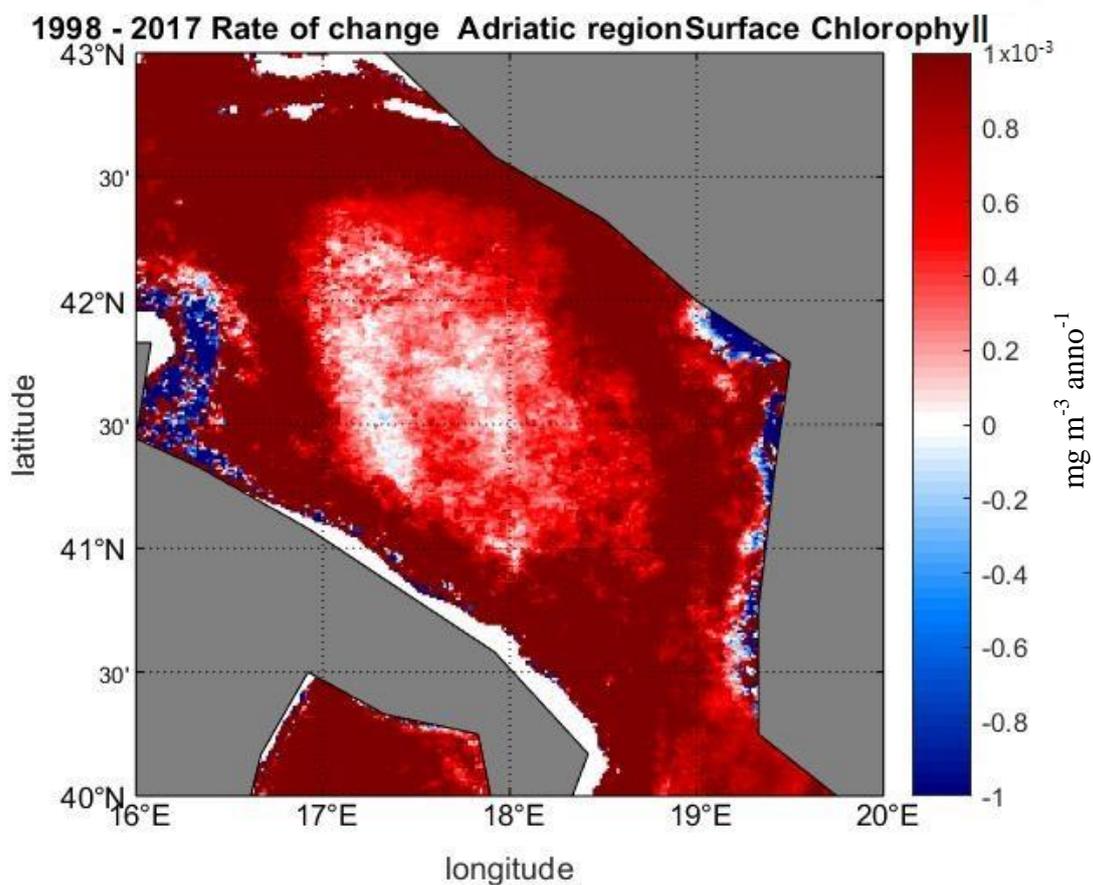


Figura 22- Trend della clorofilla superficiale nella regione 5, dell'Adriatico nel Mediterraneo (1998-2017), calcolato in $\text{mg m}^{-3} \text{ anno}^{-1}$.

Anche questa regione è caratterizzata da una circolazione ciclonica e il trend di variazione della SST calcolato su base annuale indica un marcato aumento del valore di temperatura, a cui dovrebbe corrispondere un indebolimento della circolazione Ciclonica e una conseguente diminuzione dei processi di produzione primaria. Questo è confermato dalla stima del trend temporale di variazione della concentrazione superficiale di clorofilla (Fig. 23) calcolato per i soli mesi invernali. Si nota infatti una chiara tendenza alla diminuzione nel tempo del valore di concentrazione.

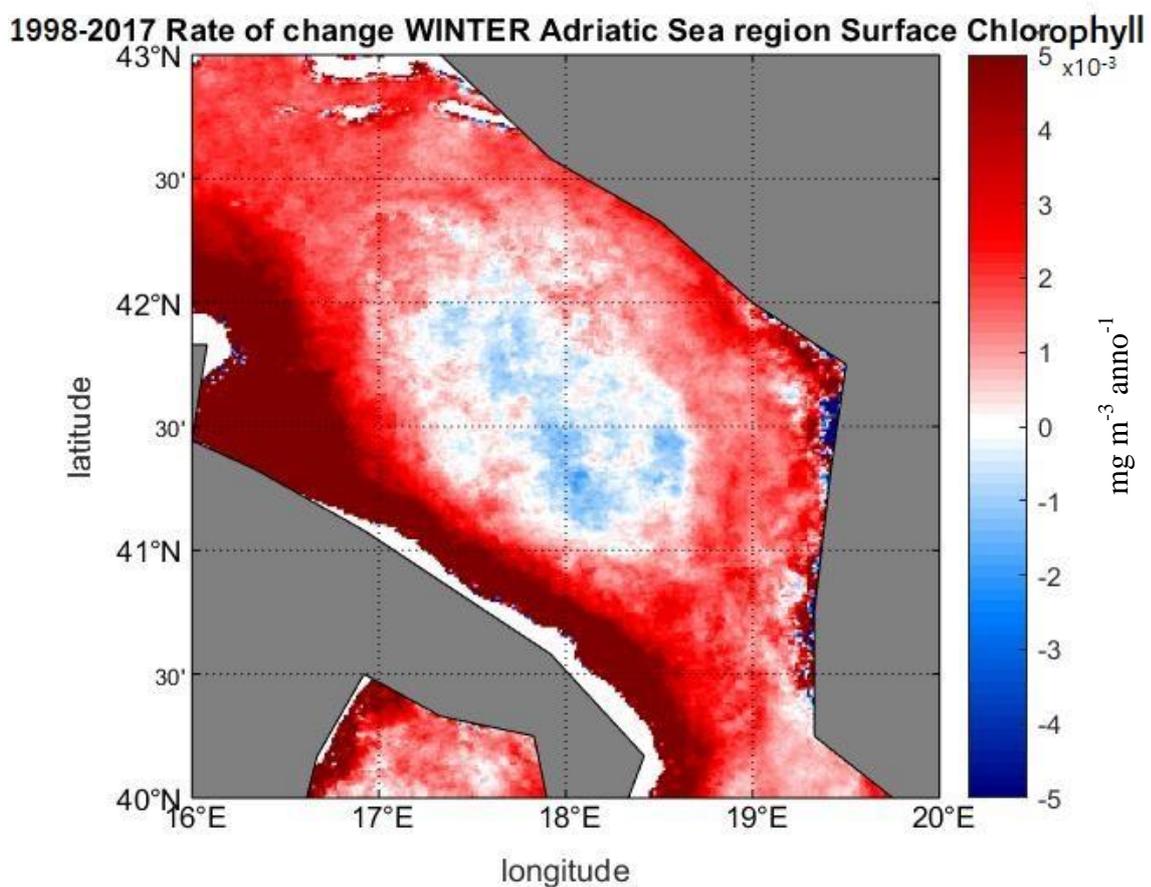


Figura 23 - Trend della clorofilla superficiale nella regione, del Mar Adriatico meridionale (1998-2017) della stagione invernale, calcolato in $\text{mg m}^{-3} \text{ anno}^{-1}$.

Per quanto riguarda infine la regione del Mediterraneo orientale dove sono localizzati lo Ierapetra e il Rhodes gyre la figura 24 riporta il trend di variazione del valore di concentrazione di clorofilla calcolato su base annuale. Al possibile indebolimento della circolazione anticiclonica indicato dalla diminuzione nel tempo del valore di SST corrisponde (come ipotizzabile un aumento dei processi di produzione primaria). Allo stesso modo all'indebolimento della circolazione ciclonica del Rhodes Gyre, determinato dalla tendenza all'aumento delle temperature, corrisponde una tendenza leggermente negativa per le concentrazioni di clorofilla superficiale.

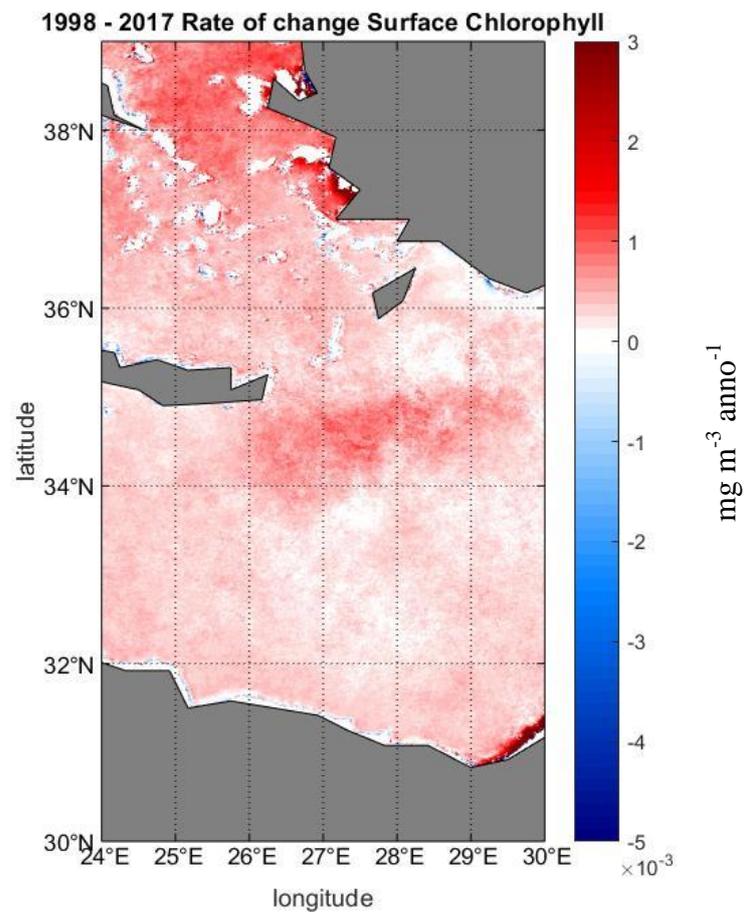


Figura 24- Trend della clorofilla superficiale nella regione del gyre di Ierapetra e del gyre di Rodi (1998-2017), calcolato in $\text{mg m}^{-3} \text{ anno}^{-1}$.

Questa connessione fra tendenze di variazione fra SST e clorofilla superficiale e livello dei questi due gyres con caratteristiche opposte è ulteriormente e fortemente confermata dal calcolo dei trends relativi alla stagione invernale (Fig. 25).

1998 - 2017 Rate of change WINTER Gyre Ierapetra region Surface Chlorophyll

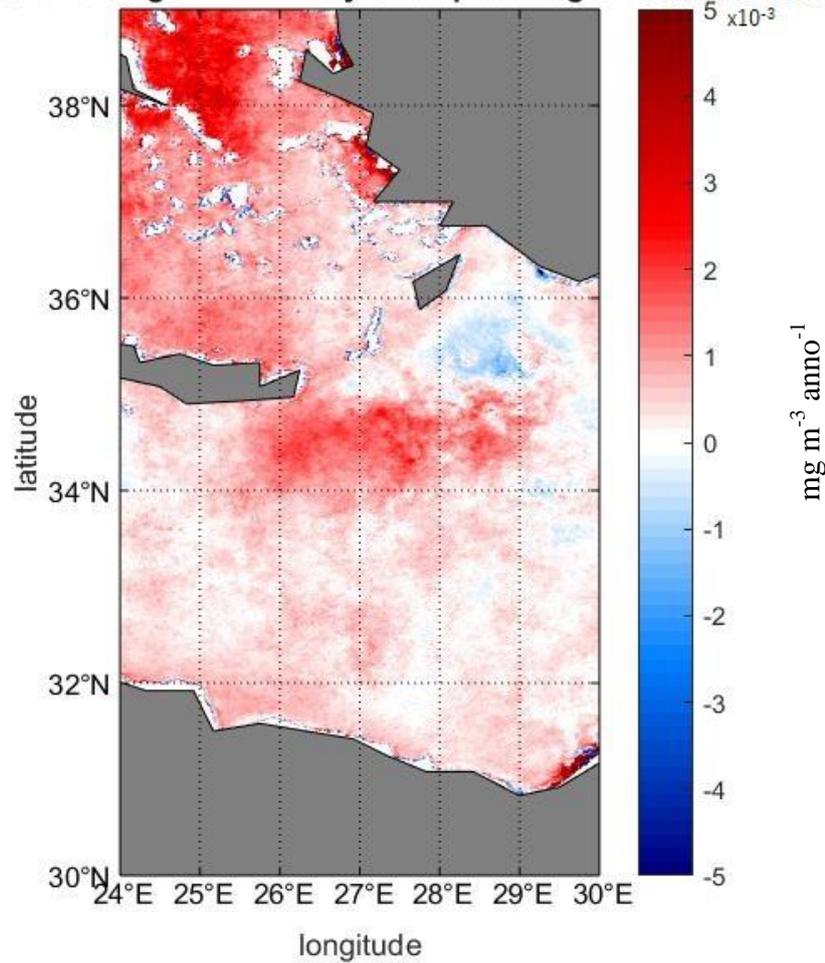


Figura 25 - Trend invernale della clorofilla superficiale nella regione del gyre di Ierapetra e del gyre di Rodi (1998-2017), calcolato in $\text{mg m}^{-3} \text{ anno}^{-1}$.

CAPITOLO 4 CONCLUSIONI

Per questo elaborato, dal sito europeo di Copernicus si è fatto il download dei dati satellitari del Mediterraneo per la clorofilla superficiale e per la temperatura superficiale, (1998-2017). Si sono successivamente analizzati i dati su Matlab generando mappe delle climatologie annuali e stagionali sia di temperatura che di clorofilla.

Inoltre, in questo elaborato si è calcolato anche un trend temporale anche per la stagione invernale, da Gennaio a Marzo per notare maggiormente le variazioni della temperatura e clorofilla superficiale.

Dai risultati delle climatologie annuali e stagionali si è potuto esaminare le caratteristiche note del bacino del Mediterraneo, sia di temperatura che di clorofilla superficiale.

(Andrea Pisano et al., 2020) rileva che nel periodo 1982-2018 le acque superficiali del Mediterraneo hanno avuto un tasso di crescita della temperatura pari a $0,041-0,006$ °C/anno su tutto il Bacino. I valori di variazione temporale di variazione della temperatura calcolati in questo lavoro (si veda la fig. 12) ben si accordano con queste stime e confermano la tendenza generale di riscaldamento della acque superficiali del Mediterraneo.

Il Mar Mediterraneo mostra una forte variabilità del fitoplancton su scala regionale e di Bacino correlata alla sua natura semichiusa, alla varietà dei processi fisici e chimici che ne regolano la produttività. (Basterretxea et al., 2018), infatti in figura 6 in cui è rappresentata la mappa annuale della concentrazione di clorofilla, si nota come, soprattutto sulle coste del Nord Adriatico, Golfo del Leone, e sul Delta del Nilo, la concentrazione di clorofilla ha valori molto più elevati, da 0.5 mg/m^3 ai 6 mg/m^3 rispetto i valori dell'intero Bacino. Non solo, per la clorofilla superficiale è significativa anche la stagione, in quanto si è notato come durante la stagione invernale ci sia un aumento di clorofilla. Quello che emerge da questo elaborato sembra in linea con il lavoro di (D'Ortenzio, 2009), in quanto, sono stati impiegati dieci anni di osservazioni, come nella figura 26 sulla concentrazione di clorofilla della superficie satellitare SeaWiFS che hanno permesso di caratterizzare la biogeografia del Mar Mediterraneo e il ciclo stagionale della biomassa superficiale in diverse aree del Bacino (D'Ortenzio, 2009). Anche dalla figura 26 si nota come, le aree con la maggior concentrazione di clorofilla siano sulle coste, con valori massimi di 3.00 mg/m^3 soprattutto quella dell'Adriatico, quella del Golfo del Leone, quella Tunisina e del bacino Levantino.

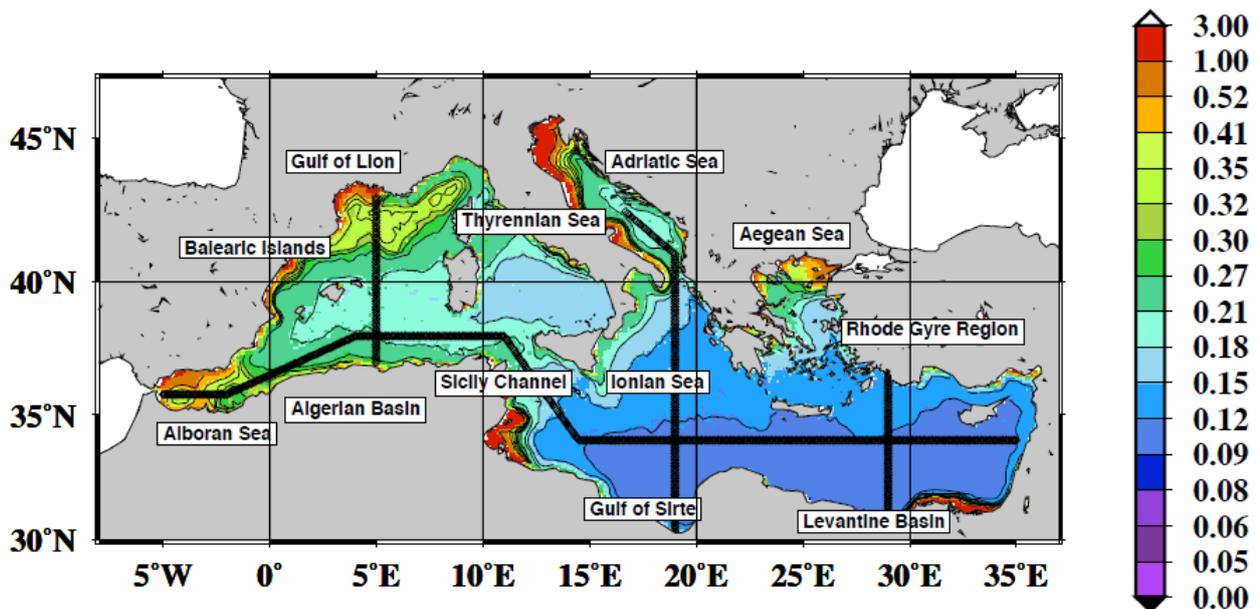


Figura 26 - Mappa media climatologica dal 1997 al 2007 della concentrazione di clorofilla in mg/m³, con, sovrainposta, i nomi delle principali regioni del Mediterraneo.

Anche nel paper di (Macias et al., 2018) si afferma che la Deep Water Convection (DC) in inverno è uno dei principali processi che determinano la produttività primaria dell'oceano aperto nel Mar Mediterraneo Nord-Occidentale. La DC è molto variabile nel tempo, a seconda delle condizioni specifiche (stratificazione, circolazione e interazioni oceano-atmosfera) di ogni specifico Inverno. Questa variabilità guida anche le oscillazioni interannuali della produttività primaria. Hanno usato un sistema di modelli accoppiati per capire in che misura la DC influisce sulla stagionalità del fitoplancton nel presente e per esplorare potenziali cambiamenti negli scenari futuri (circa al 2030). Tuttavia, per gli scenari futuri, non si è ancora quantificata l'esatta impatto dei cambiamenti climatici sulla produzione biologica complessiva del Mediterraneo ma si pensa che possa aumentare. Il modello simula i cambiamenti nella densità superficiale e nei livelli di energia cinetica che rendono l'attività meso-scala associata a correnti orizzontali un meccanismo di fertilizzazione più importante, inducendo successivamente cambiamenti fenologici nei cicli stagionali del plancton. Nella figura 27, (Macias et al., 2018) mostra una mappa del NW del Mediterraneo in cui è rappresentata la concentrazione di clorofilla esattamente come in figura 20 in cui si ha un'alta concentrazione di chl nel gyre del Golfo del Leone.

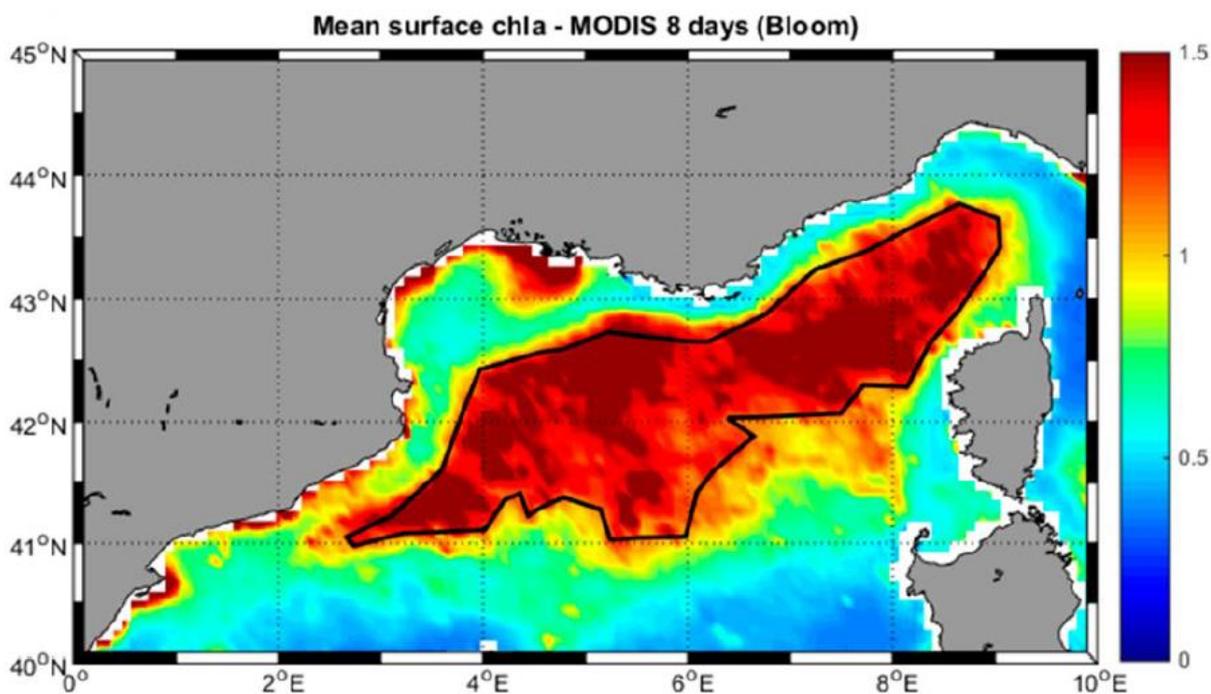


Figura 26 - Distribuzione spaziale media della clorofilla superficiale (mg/m^3) per il periodo di fioritura dai dati MODIS dal 2003 al 2015.

Per concludere, si può affermare anche da bibliografia che ci sia una correlazione tra l'aumento della temperatura superficiale e l'aumento della clorofilla superficiale. Si può anche affermare che, questo aumento di temperatura e concentrazione di clorofilla sia una conseguenza del “*warming global*” dove la responsabilità è anche per le attività antropiche.

Nel paper di (Kitsiou & Topouzelis, 2014) hanno cercato di trovare una correlazione tra la temperatura superficiale e la clorofilla superficiale sebbene in molti studi sia stata smentita questa correlazione positiva, anche in questo paper affermano che c'è un interesse di ricerca in corso in questo campo scientifico sia a scala locale che globale, poiché le aree con concentrazione maggiore di clorofilla α della superficie marina nell'ambiente acquatico sono considerate punti caldi della produttività marina risultanti da processi oceanografici, come risalite di acqua fredda, correnti forti e vortici ciclonici e anticiclonici.

Quindi dalle serie temporali di temperatura e clorofilla con media mobile si conferma la tendenza a scala di Bacino, generalmente, al riscaldamento della superficie, coerente con l'attuale processo di global warming e all'aumento delle concentrazioni della clorofilla superficiali.

Mentre dal calcolo dei trend temporali di variazioni si ipotizza che l'interazione tra trend di variazione della temperatura superficiale e della clorofilla superficiale sembra essere correlata ad un

indebolimento delle circolazioni dei gyre, sia ciclonici che anticiclonici, per quei trend di aumenti e diminuzioni temporali del valore di temperatura nei gyre ciclonici e anticiclonici.

L'indebolimento della circolazione ciclonica sembra causi un aumento delle concentrazioni di clorofilla superficiale. Ma, al contrario, un indebolimento della circolazione anticiclonica determina localmente un aumento delle concentrazioni di clorofilla superficiale.

BIBLIOGRAFIA

- Basterretxea, G., Font-Muñoz, J. S., Salgado-Hernanz, P. M., Arrieta, J., & Hernández-Carrasco, I. (2018). Patterns of chlorophyll interannual variability in Mediterranean biogeographical regions. *Remote Sensing of Environment*, *215*, 7–17.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.05.027>
- Castellari, S., Pinardi, N., & Leaman, K. (1998). A model study of air–sea interactions in the Mediterranean Sea. *Journal of Marine Systems*, *18*(1–3), 89–114.
[https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(98\)90007-0](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(98)90007-0)
- Chihoub, S., Christaki, U., Chelgham, S., Amara, R., Ramdane, Z., Zebboudj, A., Rachik, S., & Breton, E. (2020). Coastal eutrophication as a potential driver of functional homogenization of copepod species assemblages in the Mediterranean Sea. *Ecological Indicators*, *115*, 106388. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106388>
- Coll, M., Piroddi, C., Albouy, C., Ben Rais Lasram, F., Cheung, W. W. L., Christensen, V., Karpouzi, V. S., Guilhaumon, F., Mouillot, D., Paleczny, M., Palomares, M. L., Steenbeek, J., Trujillo, P., Watson, R., & Pauly, D. (2012). The Mediterranean Sea under siege: Spatial overlap between marine biodiversity, cumulative threats and marine reserves: The Mediterranean Sea under siege. *Global Ecology and Biogeography*, *21*(4), 465–480.
<https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2011.00697.x>
- D’Ortenzio, F. (2009). *On the trophic regimes of the Mediterranean Sea: A satellite analysis*. 10.

- Heuzé, C., Carvajal, G., Eriksson, L., & Soja-Woźniak, M. (2017). Sea Surface Currents Estimated from Spaceborne Infrared Images Validated against Reanalysis Data and Drifters in the Mediterranean Sea. *Remote Sensing*, 9(5), 422. <https://doi.org/10.3390/rs9050422>
- Kitsiou, D., & Topouzelis, K. (2014). CORRELATION BETWEEN CHLOROPHYLL A CONCENTRATION AND SEA SURFACE TEMPERATURE IN THE EASTERN MEDITERRANEAN SEA USING GIS AND SATELLITE DATA. *Fresenius Environmental Bulletin*, 23(11), 8.
- Korres, G., Pinardi, N., & Lascaratos, A. (2000). The Ocean Response to Low-Frequency Interannual Atmospheric Variability in the Mediterranean Sea. Part I: Sensitivity Experiments and Energy Analysis. *JOURNAL OF CLIMATE*, 13, 27.
- Macias, D., Garcia-Gorritz, E., & Stips, A. (2018). Deep winter convection and phytoplankton dynamics in the NW Mediterranean Sea under present climate and future (horizon 2030) scenarios. *Scientific Reports*, 8(1), 6626. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24965-0>
- Pinardi, N., & Masetti, E. (2000). Variability of the large scale general circulation of the Mediterranean Sea from observations and modelling: A review. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 158(3–4), 153–173. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(00\)00048-1](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(00)00048-1)
- Pinardi, Nadia, 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. *Progress in Oceanography*, 132, 318–332. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2013.11.003>
- Pisano, A., Buongiorno Nardelli, B., Tronconi, C., & Santoleri, R. (2016). The new Mediterranean optimally interpolated pathfinder AVHRR SST Dataset (1982–2012). *Remote Sensing of Environment*, 176, 107–116. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.01.019>

- Pisano, Andrea, Marullo, S., Artale, V., Falcini, F., Yang, C., Leonelli, F. E., Santoleri, R., & Buongiorno Nardelli, B. (2020). New Evidence of Mediterranean Climate Change and Variability from Sea Surface Temperature Observations. *Remote Sensing*, *12*(1), 132. <https://doi.org/10.3390/rs12010132>
- 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: A proxy for climate change: THE MEDITERRANEAN-A CLIMATE PROXY. *Geophysical Research Letters*, *32*(12), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2005GL022702>
- Robinson, A. R., Leslie, W. G., Theocharis, A., & Lascaratos, A. (2001). Mediterranean Sea Circulation. In *Encyclopedia of Ocean Sciences* (pagg. 1689–1705). Elsevier. <https://doi.org/10.1006/rwos.2001.0376>
- Volpe, G., Santoleri, R., Vellucci, V., Ribera d'Alcalà, M., Marullo, S., & D'Ortenzio, F. (2007). The colour of the Mediterranean Sea: Global versus regional bio-optical algorithms evaluation and implication for satellite chlorophyll estimates. *Remote Sensing of Environment*, *107*(4), 625–638. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.10.017>

SITOGRAFIA

<https://www.minambiente.it/>

<https://marine.copernicus.eu/>

<https://www.arpa.umbria.it/>

https://www.esteri.it/mae/it/politica_estera/organizzazioni_internazionali/ocse.html

www.minambiente.it/direttive/direttive-acque

RINGRAZIAMENTI

Ringrazio il Prof. Zavatarelli Marco per avermi dato l'opportunità di seguirmi in un progetto di tesi, lo ringrazio per il suo insegnamento, per la sua fiducia, per avermi supportata in questo percorso anche durante una pandemia globale.

Un ringraziamento speciale per il Dott. Luca Giacomelli, per avermi aiutata con la sua sapiente conoscenza informatica anche se sopraffatto dai suoi mille impegni lavorativi, tra una riunione e l'altra.

Grazie alla Dott.ssa Simona Simoncelli, che, anche con una telefonata è riuscita a fornirmi consigli validi e incoraggiamenti per questo percorso.

Come non ringraziare la mia famiglia, senza di loro non sarei potuta arrivare fino qui, grazie perché mi ha sempre sopportata e supportata a non demordere e arrivare alla fine di questo percorso un po' travagliato.

Grazie alla mia complice in casa e nella vita, Alice, il regalo più bello che i miei genitori potessero farmi, una Sorella che mi è sempre vicino e mi capisce al volo.

Grazie alla mia nonna Lia, speciale per me, mi ha sempre detto di andare avanti e mi ha dato forza, a suo modo, di pensare che non era finita e che era solo una battaglia persa.

Grazie a Massi, un abile compagno di corso e un amico, pronto ad aiutarmi.

Grazie agli amici di sempre, quelli che anche con un messaggio facevano sapere che c'erano, quelli che mi hanno aiutato a non mollare e che mi hanno sempre fatto sorridere. Grazie, vi voglio bene ma lo sapete già.