



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

FLORE

Repository istituzionale dell'Università degli Studi di Firenze

Le campagne di rilevamento in situ dello stato ecologico e delle proprietà bio-ottiche

Questa è la Versione finale referata (Post print/Accepted manuscript) della seguente pubblicazione:

Original Citation:

Le campagne di rilevamento in situ dello stato ecologico e delle proprietà bio-ottiche / C. Nuccio; L. Massi; L. Lazzara; F. Polonelli; M. Mannucci; C. Melillo; G. Mori; E. Organelli; F. Fani; C. Lapucci; F. Galgani. - ELETTRONICO. - (2012), pp. 431-471.

Availability:

The webpage <https://hdl.handle.net/2158/805676> of the repository was last updated on

Terms of use:

Open Access

La pubblicazione è resa disponibile sotto le norme e i termini della licenza di deposito, secondo quanto stabilito dalla Policy per l'accesso aperto dell'Università degli Studi di Firenze (<https://www.sba.unifi.it/upload/policy-oa-2016-1.pdf>)

Publisher copyright claim:

La data sopra indicata si riferisce all'ultimo aggiornamento della scheda del Repository FloRe - The above-mentioned date refers to the last update of the record in the Institutional Repository FloRe

(Article begins on next page)

Metodologie di Monitoraggio dell'Ambiente Marino

RAPPORTO FINALE



*La Coopération au coeur
de la Méditerranée*



*La Cooperazione al cuore
del Mediterraneo*



METODOLOGIE DI MONITORAGGIO DELL'AMBIENTE MARINO RAPPORTO FINALE PROGETTO MOMAR

Programma cofinanziato con il Fondo Europeo
di Sviluppo Regionale



Programme cofinancé par le Fonds Européen
de Développement Régional



Ifremer



Consorzio
LaMMa

cibm



PLURAL

6.2. Le campagne di rilevamento in situ dello stato ecologico e delle proprietà bio-ottiche

C. Nuccio*, L. Massi*, L. Lazzara*, F. Polonelli*, M. Mannucci*, C. Melillo*, G. Mori*, E. Organelli*, F. Fani*, C. Lapucci¹, F. Galgani²

* CIBM - Università di Firenze, Dipartimento di Biologia Evoluzionistica Via P.A. Micheli, 1 50121 Firenze, Italy.

¹ LaMMA - Laboratorio di Monitoraggio e Modellistica ambientale per lo sviluppo sostenibile, Via Madonna del Piano 10, 50019 Sesto Fiorentino (FI), Italia

² IFREMER LER/PAC, Centre de Méditerranée, Zone Portuaire de Brégailion BP 330 8350, la Seyne Sur Mer, Cedex, France

6.2.1. Campagne MOMAR

Abstract

Nell'ambito del progetto MOMAR le esperienze accumulate nello studio delle caratteristiche ottiche delle acque dell'Arcipelago Toscano durante le collaborazioni con IBIMET e LaMMA sono state indirizzate ad approntare un sistema semioperativo di monitoraggio satellitare della qualità di queste acque basato sulle concentrazioni della biomassa fitoplanctonica, stimata mediante la concentrazione della clorofilla (Chl), della sostanza organica disciolta cromoforica (CDOM) e del materiale particellato totale (SPM) e non fitoplanctonico (NAP). In particolare la nostra attività è stata rivolta ad ottenere una valutazione aggiornata delle proprietà ottiche del mare e dei principali componenti otticamente attivi e delle loro relazioni con la biomassa fitoplanctonica con lo scopo di migliorare gli algoritmi esistenti o proporre di nuovi caratterizzati da una maggiore efficienza delle stime satellitari come ad es sono quelli di tipo semianalitico. Sono state inoltre, indagate le influenze sulla caratterizzazione bio-ottica della composizione tassonomica dei popolamenti fitoplanctonici e delle condizioni fisiche e trofiche della colonna d'acqua.

Le acque antistanti la regione Toscana risultano da un punto di vista ottico difficilmente classificabili rispetto ai modelli utilizzati evidenziando caratteristiche intermedie sia rispetto alle tipiche acque costiere, generalmente poco trasparenti, dove sono alti e molto variabili sia gli apporti di materiali particellati (trasporto fluviale, risospensione di sedimenti) che disciolti (sostanze organiche disciolte cromoforiche); sia rispetto a quelle del largo, generalmente più trasparenti e poco influenzate dai fenomeni sopra ricordati, nelle quali generalmente sono prevalenti gli effetti del fitoplancton, che comunque è presente in concentrazioni generalmente più basse rispetto a quelle costiere. Quindi le classificazioni ottiche più utilizzate, che normalmente si usano per guidare la scelta degli algoritmi satellitari migliori da utilizzare,

risultano in queste acque di poca utilità, per le quali, data la loro complessità e peculiarità, sono molto più rispondenti alla realtà ed utili ai fini pratici quelle che in maniera continua “fuzzy” prevedono una serie di condizioni intermedie fra i due estremi.

In queste acque i rapporti CDOM/Chl e soprattutto quelli SPM/Chl risultano generalmente più alti di quelli delle acque del largo del Mare Mediterraneo, inoltre nonostante che il valore alto di questi rapporti possa far pensare alla prevalenza di apporti esterni non collegati alla biomassa fitoplanctonica, in realtà entrambi CDOM e SPM mostrano una correlazione con la Chl altamente significativa. Questa peculiare caratteristica determina la necessità di un adeguamento degli algoritmi satellitari di stima della Chl che in generale sono calibrati per acque dove questi rapporti sono significativamente più bassi.

Inoltre allo scopo di migliorare le stime satellitari dei componenti otticamente attivi e con la prospettiva di mettere a punto un algoritmo di calcolo regionale che si basi su un modello semianalitico è stata analizzata la variabilità degli assorbimenti e retrodiffusioni specifici (per unità di concentrazione di materiale assorbente o retrodiffondente) di fitoplancton e particellato non fitoplanctonico che sono parametri indispensabili per il modello. Per quanto si riferisce agli assorbimenti specifici è stata rilevata una forte variabilità in termini assoluti, la quale, però, è gran parte spiegata dalle variazioni delle concentrazioni di Chl.

Il fitoplancton si presenta in queste acque con una composizione tassonomica altamente differenziata, con popolamenti in cui coesistono molte classi in proporzioni notevolmente variabili tra loro, determinando variabilità sia nell'assorbimento in relazione alla differente composizione pigmentaria, sia nella retrodiffusione molto differenziata fra le classi e maggiore nei coccolitofori che risultano il gruppo dominante. Non sono state rilevate fioriture “anomale”, né condizioni trofiche che oltrepassino lo stato oligo-mesotrofico, anche se sono evidenti le particolari caratteristiche ecologiche influenzate dalla diluizione, anche a lunga distanza, delle acque dolci continentali.

In conclusione le acque dell'Arcipelago Toscano mostrano evidenti peculiarità ottiche in gran parte legate alle caratteristiche geomorfologiche ed idrodinamiche dell'area dell'Arcipelago Toscano. Queste acque insistono sulla piattaforma continentale che si estende molto davanti alla costa toscana, costituendo un bacino con ridotti (di lungo periodo, su scala stagionale) idrodinamismo e scambi rispetto alla circolazione generale tirrenica e ligure. In questa situazione gli apporti dei principali fiumi della Toscana ed i fenomeni di risospensione danno un contributo significativo di SPM, CDOM e nutrienti nelle acque superficiali. Questi contributi influenzano quindi l'ecologia e le proprietà ottiche dell'area.

6.2.2. Premessa

Nell'ambito dello sviluppo di un sistema semioperativo di monitoraggio satellitare della qualità delle acque del mare della Toscana (vedi Par. 6.1.) l'attività del gruppo CIBM-Università di Firenze, è stata rivolta ad ottenere una valutazione aggiornata delle proprietà ottiche del mare e dei principali componenti otticamente attivi e delle loro relazioni con la biomassa fitoplanctonica con lo scopo di migliorare o proporre nuovi algoritmi caratterizzati da una maggiore efficienza nelle stime di Chl, CDOM e NAP. Sono state inoltre, indagate le influenze sulla caratterizzazione bio-ottica della composizione tassonomica dei popolamenti fitoplanctonici e delle condizioni fisiche e trofiche della colonna d'acqua. In questa relazione viene sinteticamente presentata l'attività svolta e vengono analizzati i primi risultati ottenuti dalle indagini.

6.2.3. Misure ed analisi effettuate

Sono state svolte 5 campagne di rilevamento per mezzo della M/n Blue Dream su tre transetti (Fig. 6.1) dove sono state effettuate misure e campionamenti in tre stazioni poste a 3, 10 e tra 25 e 30 km dalla costa. Nella Fig. 6.1 sono indicate anche le coordinate delle stazioni e in Tabella 6.1 sono sinteticamente riportate le misure e le analisi effettuate.

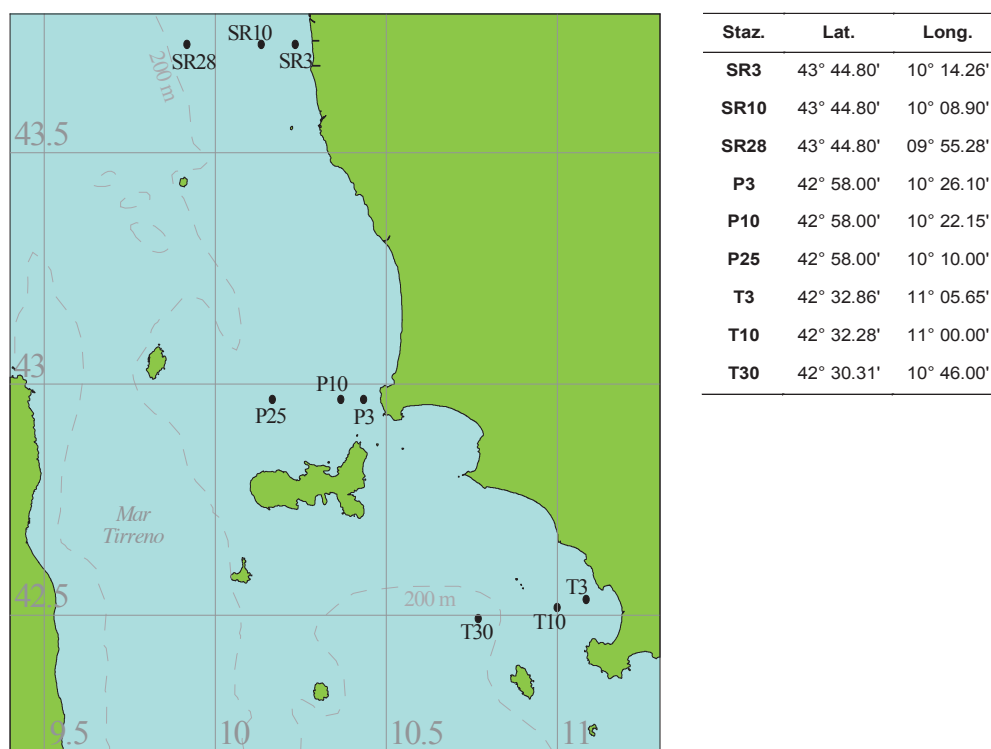


Fig. 6.1. Ubicazione dei transetti e coordinate delle stazioni di prelievo.

In ogni stazione sono state eseguiti: 1) profili CTD con sonda multiparametrica (Idronaut Ocean Seven); 2) misure di irradianza quantica PAR superficiale e sottomarina, contemporaneamente sono state effettuate misure della

fluorescenza naturale della clorofilla a e della temperatura (PUV 510 Biospherical); 3) spettri dell'irradianza discendente sulla superficie marina ed a varie profondità nella colonna d'acqua (5, 10, 25 e 50 m) e spettri dell'irradianza ascendente a 5 e 10 m (spettrometro LI-COR LI 1800UW). Da queste misure in ogni stazione sono stati ricavati il coefficiente di attenuazione verticale dell'irradianza ($k(\lambda)$) e la riflettanza spettrale subsuperficiale ($R(\lambda)$).

Tabella 6.1. Date di campionamento e informazioni sulle misure e analisi complessivamente effettuate.

Date campagne	Stazioni campionate	Campioni prelevati	Misure in situ (per stazione)	
23/03/2010	T3, T10, T30	10	CTD	
24/03/2010	P3, P10, P25	10	irradianza globale	
16/04/2010	SR3, SR10, SR28	9	PAR sottomarina	
19/07/2010	SR3, SR10, SR28	9	irradianza spettrale sottomarina	
21/07/2010	P3, P10, P30	10	riflettanza spettrale	
22/07/2010	T3, T10, T30	10		
13/01/2011	T3, T10, T30	10	fluorescenza variabile	
14/01/2011	P3, P10, P30	10		
09/02/2011	SR3, SR10, SR28	9		
12/04/2011	SR3, SR10, SR28	9		
19/04/2011	T3, T10, T30	12		
20/04/2011	P3, P10, P30	9		
12/07/2011	T3, T10, T30	10		
29/07/2011	P3, P10, P30	10		
Totali	42	137		254
Parametri analizzati				N.ro analisi
nitriti, nitrati, fosfati, silicati			548	
clorofilla a			137	
particellato sospeso (SPM)			137	
sostanza organica disciolta (CDOM)			137	
diversità pigmentaria			137	
composizione tassonomica fitoplancton			137	
assorbimento della luce			137	
Totale analisi			1370	

Allo scopo di acquisire dati in situ relativi alle stime satellitari della produzione primaria, sono state effettuate misure di fluorescenza variabile modulata (WaterPAM, Walz) secondo il protocollo previsto nelle linee guida ISPRA (Lazzara et al., 2010b) per ottenere le curve P-E dei popolamenti fitoplanctonici naturali. Le misure sono state realizzate sui campioni delle stazioni di San Rossore, Piombino e Talamone superficiali costieri (3 km) e del largo (30 km) e su quelli profondi del solo largo, subito dopo il prelievo e se non possibile, dopo 24 ore, durante le 5 campagne stagionali di campionamento.

Per le analisi da effettuare successivamente in laboratorio, sono stati prelevati campioni d'acqua mediante bottiglie tipo Niskin (10 l) alle profondità di 0, 10, 25, 50 m.

Le concentrazioni della clorofilla a e dei principali pigmenti fitoplanctonici (filtrazione su filtri Whatman GF/F Ø 47 mm ed estrazione in acetone 90%) sono state misurate tramite cromatografia liquida ad alta risoluzione - HPLC - (SHIMADZU Class VP) secondo Vidussi et al. (1996) e Barlow et al. (1997). Come indicatore della biomassa fitoplanctonica è stata usata la somma di clorofilla a + divinil clorofilla a + clorofillide a, denominata in seguito Chl.

Le misure ponderali del materiale particellato in sospensione (SPM) sono state effettuate (filtrazione su filtri Whatman GF/F Ø 47 mm prepesati e mantenuti successivamente a 75°C per 24 h) secondo Strickland e Parson (1972) modificato da Van der Linde (1998) per l'eliminazione del sale residuo.

Le misure degli spettri di assorbimento del fitoplancton e del materiale particellato non fitoplanctonico (NAP) sono state effettuate secondo Massi e Lazzara (2010) mediante spettrometro LI-COR LI1800UW equipaggiato con sfera integratrice LI-COR LI1800-12S, raccogliendo il particellato totale su filtri Whatman GF/F Ø 25 mm e utilizzando il metodo T-R (Tassan e Ferrari, 1995). La suddivisione dell'assorbimento del fitoplancton da quello del particellato non fitoplanctonico (NAP) è stata effettuata facendo misure prima e dopo estrazione (metanolo assoluto) del contenuto pigmentario del fitoplancton (Kishino et al., 1985).

La concentrazione della sostanza organica disciolta cromoforica (CDOM) è stata stimata su campioni d'acqua prefiltrati su filtri Whatman GF/F Ø 47 mm e successivamente su Nuclepore PC 0.2 µm, mediante la misura del suo assorbimento a 400 nm ($a_{CDOM}(400)$). Questo valore è stato ottenuto a partire dagli spettri di densità ottica (Shimadzu UVPC2501) trasformati in spettri assorbimento (Bricaud et al., 1981). $a_{CDOM}(400)$ ed il parametro S, che descrive le caratteristiche spettrali della CDOM, sono stati ottenuti mediante interpolazione non lineare degli spettri di assorbimento fra 300 e 700 nm (Stedmon et al., 2000; Twarkowsky et al., 2004).

Sono state inoltre determinate le concentrazioni dei principali nutrienti inorganici disciolti (nitriti, nitrati, ortofosfati, silicati) e di azoto e fosforo totali secondo le metodologie standard (Socal et al., 2010) mediante AutoAnalyzer

Bran Lubbe. Con la sigla DIN, utilizzata in seguito, si intende la somma della concentrazione di nitrato + quella di nitrito.

500 ml di acqua sono stati fissati con formalina (concentrazione finale 1.5%) per il conteggio e la determinazione della componente micro- e nanofitoplanctonica effettuati al microscopio ottico rovesciato (Zeiss IM, IM35, 20x, 40x) dopo sedimentazione di volumi variabili tra 50 e 100 ml (Zingone et al., 2010). Per l'identificazione tassonomica si fa riferimento ai testi citati in Zingone et al. (2010).

6.2.4. Risultati

6.2.4.1. Condizioni idrologiche e trofiche

L'analisi delle condizioni idrologiche (Fig. 6.2) nei primi 100 m della colonna d'acqua mostra la evidente scala stagionale di variazione tra i mesi inverno-primaverili con una situazione termica (Fig. 6.2 a, b, c) relativamente omogenea lungo la colonna d'acqua e la presenza di un termocline nel periodo estivo.

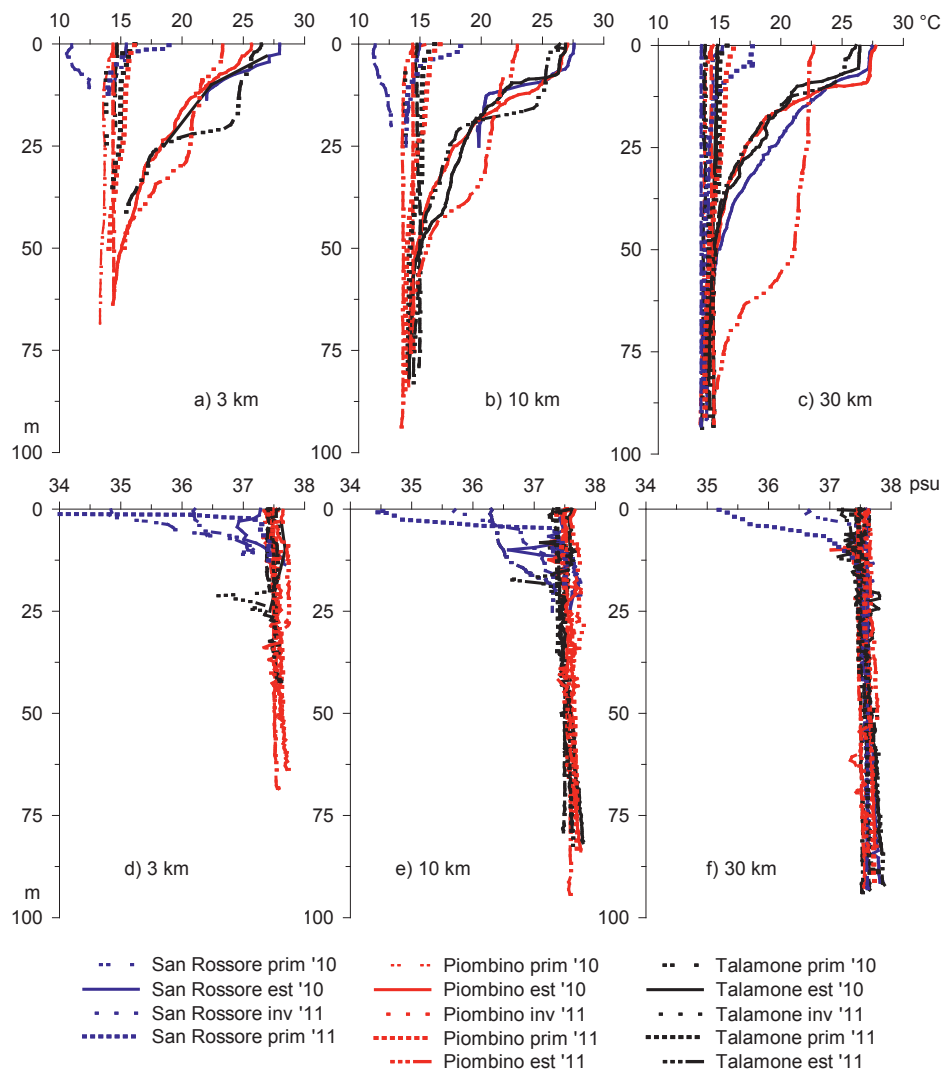


Fig. 6.2. Profili di temperatura (°C): a) st. a 3 km, b) st. a 10 km, c) st. a 30 km, e profili di salinità (psu): d) st. a 3 km, e) st. a 10 km, f) st. a 30 km.

Le condizioni di maggiore omogeneità termica sono state rilevate nel campionamento invernale del 2011, con le più alte temperature superficiali (14.8°C) a T30 e le più basse a SR (circa 11°C), che mantiene comunque le più basse temperature anche in profondità (Fig. 6.2c). Già nei campionamenti primaverili, sia del 2010 che del 2011, si nota l'instaurarsi del riscaldamento superficiale, che porta ad un gradiente termico molto pronunciato nei primi 10 metri che continua più gradualmente nella colonna sottostante. La primavera del 2011 presenta temperature superficiali più alte (fino a circa 19°C) rispetto al 2010 (non oltre 15.5°C), sempre rilevate a SR. In estate si rileva la formazione di uno strato omeotermo superficiale e quindi rimescolato che comincia a strutturarsi nei primi 10-20 metri, separato dallo strato sottostante dal

termocline che limita quindi il mescolamento della colonna d'acqua. I profili di salinità (Fig. 6.2d, e, f) mostrano come le stazioni dei transetti Piombino e Talamone presentino una relativa omogeneità lungo tutta la colonna d'acqua, tranne che per qualche variazione nei primi 25 m soprattutto per Talamone (Fig. 6.2d, e) in estate, dove sono visibili intrusioni di acque meno salate dovute probabilmente a fenomeni locali. Nel transetto SR, particolarmente nei mesi inverno-primaverili, è evidente la bassa salinità superficiale (fino a circa 34.5) dovuta agli apporti delle acque dolci continentali che sono visibili fino a 10 e 28 km soprattutto in inverno-primavera, corrispondenti ai periodi di maggiore portata dei fiumi. In Tabella 6.2 sono riportate le concentrazioni medie dei nutrienti fitoplanctonici, della clorofilla *a*, delle densità cellulari, del particolato in sospensione (SPM) e della sostanza organica disciolta cromoforica (CDOM), utili alla caratterizzazione ecologica e bio-ottica dell'area.

Tabella 6.2. Concentrazioni medie (\pm dev. st.) di nutrienti (μM), clorofilla *a* (mg m^{-3}), densità cellulare (cell L^{-1}), particolato sospeso (SPM, mg L^{-1}) e sostanza organica disciolta (CDOM, $\text{a}_{\text{CDOM}}(400) \text{ m}^{-1}$). 3 km, 10 km, 30 km = medie alle stazioni alle relative distanze dalla costa. DIN= NO_2+NO_3 . Area = media generale (N=137).

Staz.	SiO ₂	PO ₄	DIN	Chl	cell L ⁻¹	SPM	CDOM
SR3	1.534 \pm 0.88	0.092 \pm 0.06	0.412 \pm 0.31	1.233 \pm 0.89	3.6 10 ⁵ \pm 2.9 10 ⁵	1.387 \pm 0.42	0.109 \pm 0.05
P3	0.958 \pm 0.53	0.056 \pm 0.05	0.372 \pm 0.42	0.316 \pm 0.30	4.8 10 ⁴ \pm 3.5 10 ⁴	1.126 \pm 0.28	0.031 \pm 0.02
T3	1.207 \pm 0.60	0.047 \pm 0.02	0.337 \pm 0.26	0.516 \pm 0.49	7.3 10 ⁴ \pm 4.6 10 ⁴	1.427 \pm 0.67	0.039 \pm 0.02
3 km	1.178 \pm 0.66	0.060 \pm 0.05	0.367 \pm 0.33	0.588 \pm 0.63	1.2 10 ⁵ \pm 1.8 10 ⁵	1.299 \pm 0.61	0.051 \pm 0.04
SR10	1.287 \pm 0.63	0.090 \pm 0.06	0.507 \pm 0.39	0.762 \pm 0.56	1.6 10 ⁵ \pm 1.4 10 ⁵	1.543 \pm 0.54	0.085 \pm 0.03
P10	0.915 \pm 0.52	0.048 \pm 0.03	0.272 \pm 0.18	0.313 \pm 0.30	5.2 10 ⁴ \pm 3.5 10 ⁴	1.101 \pm 0.29	0.030 \pm 0.02
T10	1.066 \pm 0.66	0.058 \pm 0.02	0.282 \pm 0.27	0.321 \pm 0.27	6.5 10 ⁴ \pm 2.8 10 ⁴	1.248 \pm 0.27	0.038 \pm 0.01
10 km	1.079 \pm 0.61	0.064 \pm 0.04	0.343 \pm 0.30	0.444 \pm 0.43	8.7 10 ⁴ \pm 8.9 10 ⁴	1.283 \pm 0.41	0.049 \pm 0.03
SR28	1.269 \pm 0.60	0.080 \pm 0.03	0.405 \pm 0.30	0.352 \pm 0.21	7.4 10 ⁴ \pm 7.6 10 ⁴	1.126 \pm 0.20	0.060 \pm 0.03
P25	1.068 \pm 0.62	0.049 \pm 0.02	0.253 \pm 0.24	0.277 \pm 0.25	4.9 10 ⁴ \pm 2.7 10 ⁴	1.354 \pm 0.24	0.036 \pm 0.02
T30	0.991 \pm 0.48	0.057 \pm 0.03	0.260 \pm 0.24	0.294 \pm 0.26	6.4 10 ⁴ \pm 2.4 10 ⁴	1.210 \pm 0.25	0.045 \pm 0.03
30 km	1.096 \pm 0.57	0.061 \pm 0.03	0.298 \pm 0.26	0.305 \pm 0.24	6.1 10 ⁴ \pm 4.6 10 ⁴	1.237 \pm 0.23	0.046 \pm 0.03
Area	1.113 \pm 0.61	0.061 \pm 0.04	0.331 \pm 0.29	0.426 \pm 0.45	8.6 10 ⁴ \pm 1.1 10 ⁵	1.268 \pm 0.49	0.048 \pm 0.03

Le concentrazioni di nutrienti e Chl evidenziano una generale oligo-mesotrofia, con i massimi valori nel transetto San Rossore, in particolare SR3, la diminuzione dei valori dalla costa al largo (Tabella 6.2) e oscillazioni prevalentemente in relazione alle variazioni stagionali. Una rappresentazione sintetica della variazione stagionale delle concentrazioni medie di DIN, PO₄ e clorofilla *a* per ogni stazione è visibile in Fig. 6.3.

Le maggiori concentrazioni sono invernali e primaverili per tutta l'area e lungo tutta la colonna d'acqua. In questi periodi il DIN generalmente raggiunge 1 μM come massimo valore invernale (1.6 μM a P3), particolarmente a San Rossore e PO₄ non supera 0.1 μM tranne che per pochi valori sempre a San Rossore e P3. Chl, intorno a 0.5 nel transetto Piombino, supera spesso 1 mg m^{-3} a San Rossore, dove si arriva a oltre 2.6 mg m^{-3} , e T3. E' visibile una differenza tra primavera 2010 e primavera 2011, soprattutto nei transetti Piombino e Talamone dove i valori del 2011 sono più simili a quelli estivi (Fig. 6.3), probabilmente in relazione alla variabilità interannuale delle fasi di sviluppo delle fioriture

fitoplanctoniche. I minimi sono estivi, quando Chl è prevalentemente minore di 0.1 mg m^{-3} e decresce fino a valori minori di 0.05 mg m^{-3} soprattutto nel transetto Piombino.

Da una osservazione preliminare emerge quindi una variazione stagionale tipica per le acque dell'Arcipelago Toscano, dove il periodo di maggiore sviluppo fitoplanctonico si instaura a partire dalla fine inverno e, anche se con fasi alterne di aumenti e diminuzioni relative, si prolunga durante la primavera, in relazione prevalentemente al fotoperiodo e alla disponibilità nutritizia. Nel periodo estivo si ha la fase di maggiore scarsità di biomassa fitoplanctonica, evidente rispetto agli altri periodi sia al largo che sottocosta, dove è presumibile che anche gli apporti terrigeni risentano delle più scarse portate dei corsi d'acqua. Queste acque presentano dunque caratteristiche idrologiche e trofiche influenzate dalle condizioni meteo-climatiche stagionali, su cui insistono le peculiarità locali, come le acque lungo il transetto di San Rossore, interessate dai flussi d'acqua dolce. Prendendo in esame la variazione reciproca delle concentrazioni di azoto e fosforo, possiamo valutare la distribuzione del rapporto N/P (Fig. 6.4). Considerando che $N/P=16$ è il rapporto atomico con cui i due elementi compongono mediamente la biomassa fitoplanctonica, il valore del rapporto nell'acqua è legato alla mineralizzazione della biomassa fitoplanctonica ed alla modalità con cui il fitoplancton assimila i due nutrienti (generalmente in fase di crescita esponenziale vengono assimilati proprio con questo rapporto $N/P=16$). I rapporti calcolati nelle acque possono risultare probabilisticamente rappresentativi di una situazione di azoto carenza quando $N/P < 16$, o fosforo carenza quando $N/P > 16$ (Innamorati, 1989). I nostri dati (Fig. 6.4) sono distribuiti generalmente intorno alla media generale di $N/P \cong 4.0$, che evidenzia quindi una limitazione da azoto, che aumenta dall'inverno all'estate.

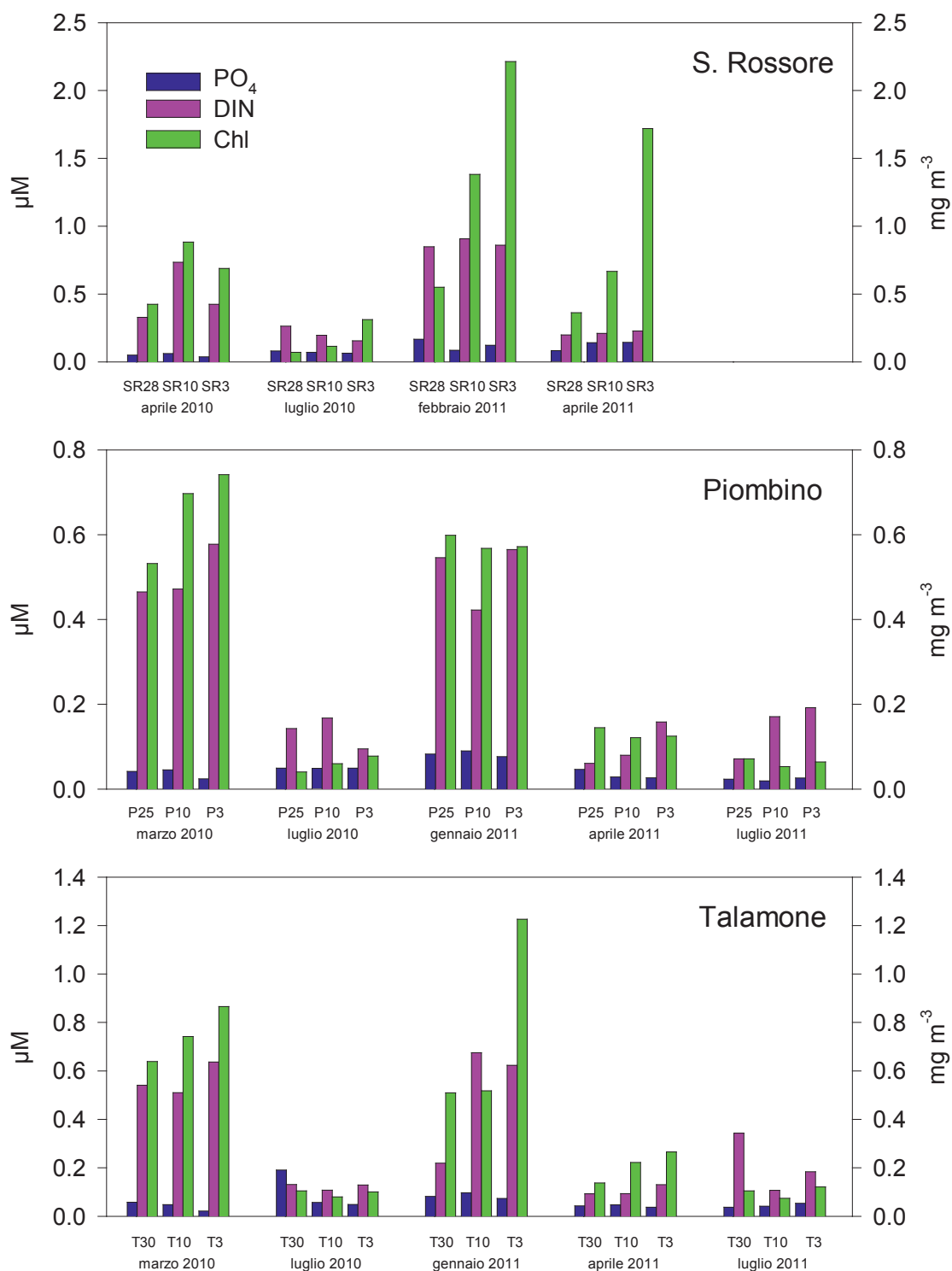


Fig. 6.3. Medie (0-10m, 0-25m, 0-50m, in relazione ai campionamenti) delle concentrazioni di DIN e PO₄ (μM) e Chl (mg m⁻³) per ogni stazione nelle diverse stagioni.

Questa era apparsa come una tipica condizione delle acque superficiali dell'Arcipelago Toscano negli anni '80, variata poi nel decennio successivo

verso valori più alti (Innamorati et al., 1995; 2001) per un tendenziale aumento dell'azoto e una diminuzione del fosforo. In base ai risultati odierni, che mostrano una diminuzione delle concentrazioni di azoto rispetto a quelle precedentemente riportate e concentrazioni di fosforo simili se non in aumento, queste osservazioni preliminari, senz'altro da approfondire, ci portano a ipotizzare una ulteriore fluttuazione della dinamica trofica avvenuta nelle acque dell'Arcipelago.

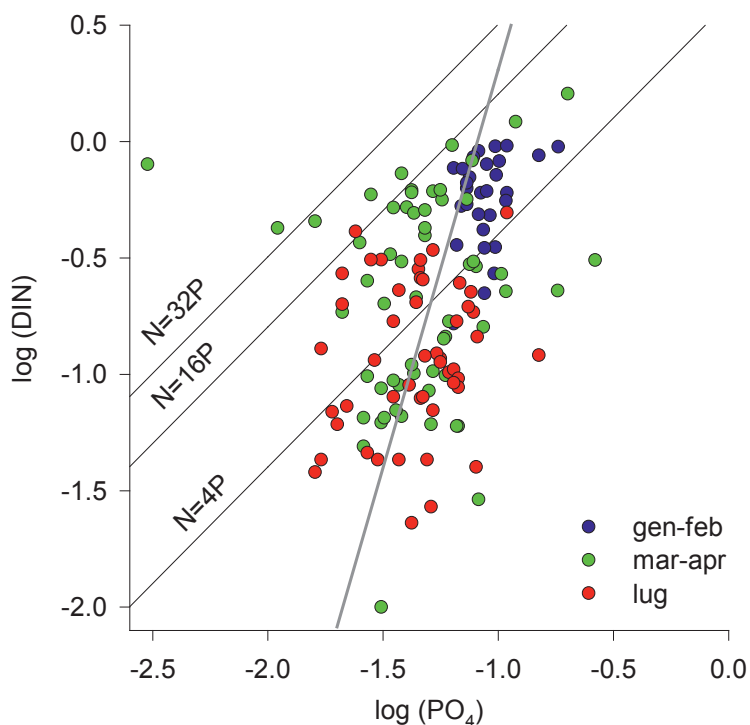


Fig. 6.4. Distribuzione dei logaritmi delle concentrazioni (μM) di DIN (NO_2+NO_3) e PO_4 . Sono tracciate le rette indicanti rapporti N/P costanti e la retta di regressione ($r=0.33$ ** $p<0.01$).

6.2.4.2. Abbondanza e composizione delle comunità fitoplanctoniche

Le densità fitoplanctoniche (Tabella 6.2) variano nel complesso di circa un ordine di grandezza, $10^4 - 10^5$ cell L^{-1} , con i massimi inverno-primaverili che non superano $2 \cdot 10^5$ cell L^{-1} nei transesti Piombino e Talamone, dove interessano tutta la colonna d'acqua, e raggiungono circa $9.5 \cdot 10^5$ cell L^{-1} in SR3 a febbraio in superficie. Le stazioni SR si distinguono proprio per i massimi superficiali, in particolar modo SR3, che mantiene costantemente le densità più alte.

Sulla scala dell'intera area esaminata quindi le maggiori differenze nelle abbondanze cellulari si hanno tra fasi stagionali diverse. La situazione che maggiormente si discosta è quella delle acque superficiali di SR3, evidentemente influenzate (Fig. 6.2) dagli apporti delle acque dolci (Arno,

Serchio) che fertilizzano maggiormente l'area, probabilmente non solo tramite i nutrienti inorganici (Fig. 6.3), ma anche con apporti maggiori di sostanza organica (Tabella 6.2) utilizzata, come è noto, dagli organismi planctonici della rete trofica pelagica.

Dalle analisi microscopiche di ogni campione è stata ottenuta la composizione tassonomica delle comunità fitoplanctoniche. Gli organismi micro- e nanoplanctonici contati e determinati a livelli tassonomici diversi appartengono a diatomee, dinoflagellati, coccolitofori, cryptophyceae. In una ulteriore categoria denominata "altre classi" sono stati raggruppati organismi appartenenti a Chlorophyceae, Chrysophyceae, Prymnesiophyceae non coccolitofori, flagellati nanoplanctonici non identificati e altro nanoplancton di incerta collocazione tassonomica e prevalentemente eterotrofo.

Generalmente il popolamento è dominato dalla frazione nanoplanctonica e la composizione tassonomica è molto diversificata, con la coesistenza, nella maggior parte dei casi, di molti gruppi differenti per filogenesi, fisiologia e dimensioni. Su questa base comune si innestano le variazioni più peculiari legate alla dominanza stagionale delle classi e la differenza evidente delle acque superficiali del transetto SR.

Una sintetica e preliminare rappresentazione della variazione della composizione tassonomica nello strato superficiale comune a tutte le stazioni è visibile in Fig. 6.5. Le diatomee dominano le densità totali in gennaio-febbraio, oltre $3 \cdot 10^5$ cell L^{-1} , a SR3 e SR10, e sono presenti, seppure in quantità ridotta, non oltre $2.5 \cdot 10^4$ cell L^{-1} , anche a Piombino e Talamone (Fig. 6.5), dove appaiono in percentuale maggiore coccolitofori e cryptophyceae. Anche in aprile a San Rossore dominano le diatomee maggiormente che negli altri siti, dove prevalgono soprattutto le cryptophyceae. I dinoflagellati sono maggiormente presenti in estate e, tranne che nel periodo invernale, è visibile spesso una larga parte del popolamento attribuita al gruppo "altre classi" (Fig. 6.5). In questo gruppo la classe spesso più abbondante è quella delle Prasinophyceae (Pyramimonas spp., Tetraselmis spp., Pseudoscurfieldia marina).

Queste prime indicazioni appaiono coerenti con quanto noto dell'Arcipelago, particolarmente: l'abbondante presenza di diatomee nelle acque di SR e la loro minore presenza al largo, anche in inverno-primavera, particolarmente dovuta a tipiche specie microplanctoniche (Chaetoceros spp., Asterionellopsis glacialis, Thalassionema spp., Pseudonitzschia spp.); l'importanza al largo delle cryptophyceae (Plagioselmis prolunga, Teleaulax sp.); la presenza diffusa di Emiliana huxleyi come principale specie tra i coccolitofori; la prevalenza estiva dei dinoflagellati con piccoli tecati (Heterocapsa spp.) e molte diverse Gymnodiniaceae.

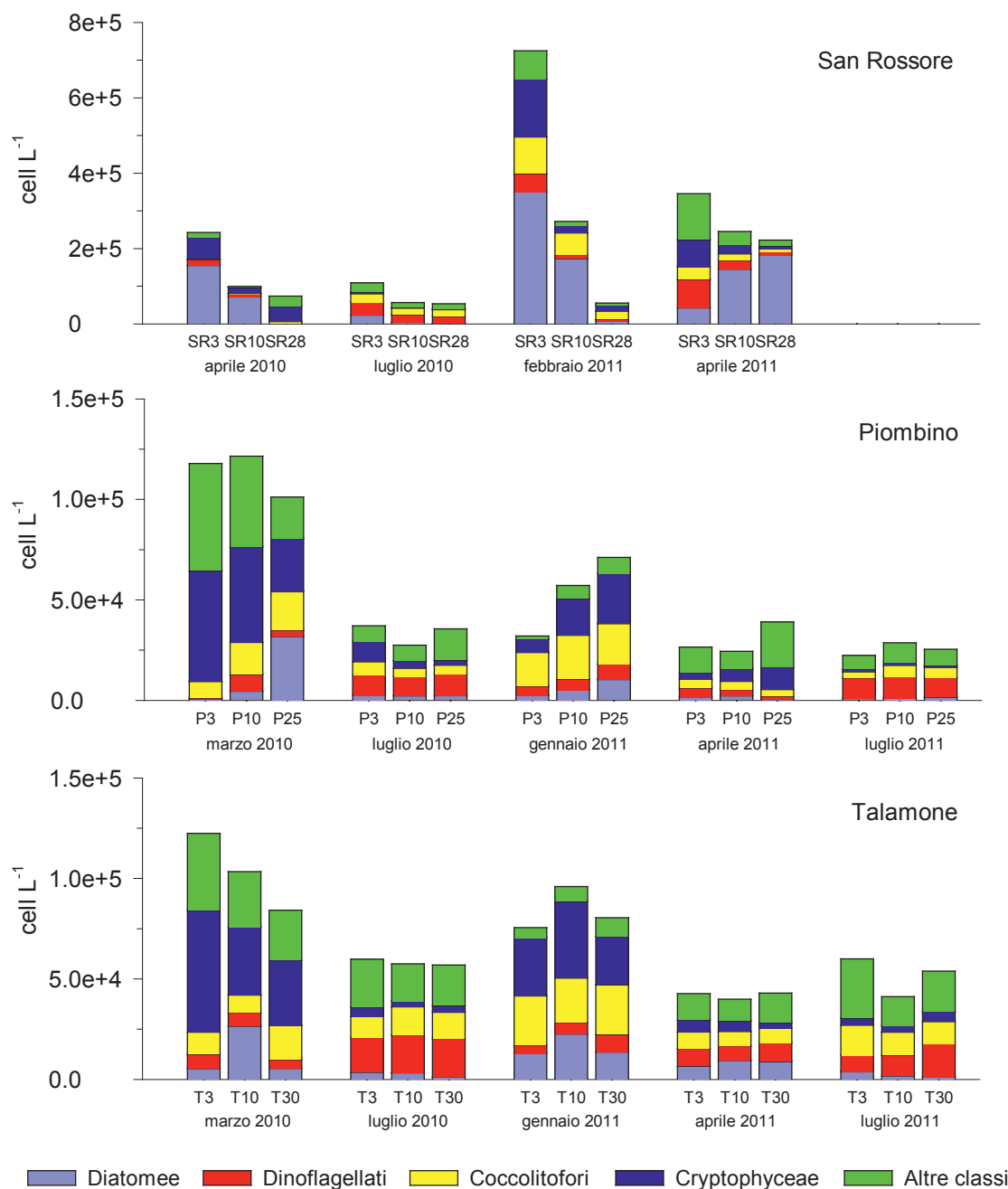


Fig. 6.5. Medie (0-10 m) delle densità (cell L⁻¹) delle classi fitoplanctoniche nelle stazioni e nei periodi indicati

6.2.4.3. Stime di Produzione Primaria da Curve Fotosintesi - Irradianza (P-I)

La produzione primaria marina è fondamentale limitata dalla disponibilità di radiazione luminosa in acqua, perciò i modelli di stima della produzione primaria telerilevata si basano principalmente sulla relazione fotosintesi - irradianza (curve P-E) ed in particolare su corrette misure dei parametri di foto-

adattamento alpha, beta, P_{max} ed E_k , capaci di definire le caratteristiche sciafile ed eliofile dei popolamenti naturali. Tramite fluorescenza variabile modulata sono state quindi misurate le curve P-E sui popolamenti fitoplanctonici naturali.

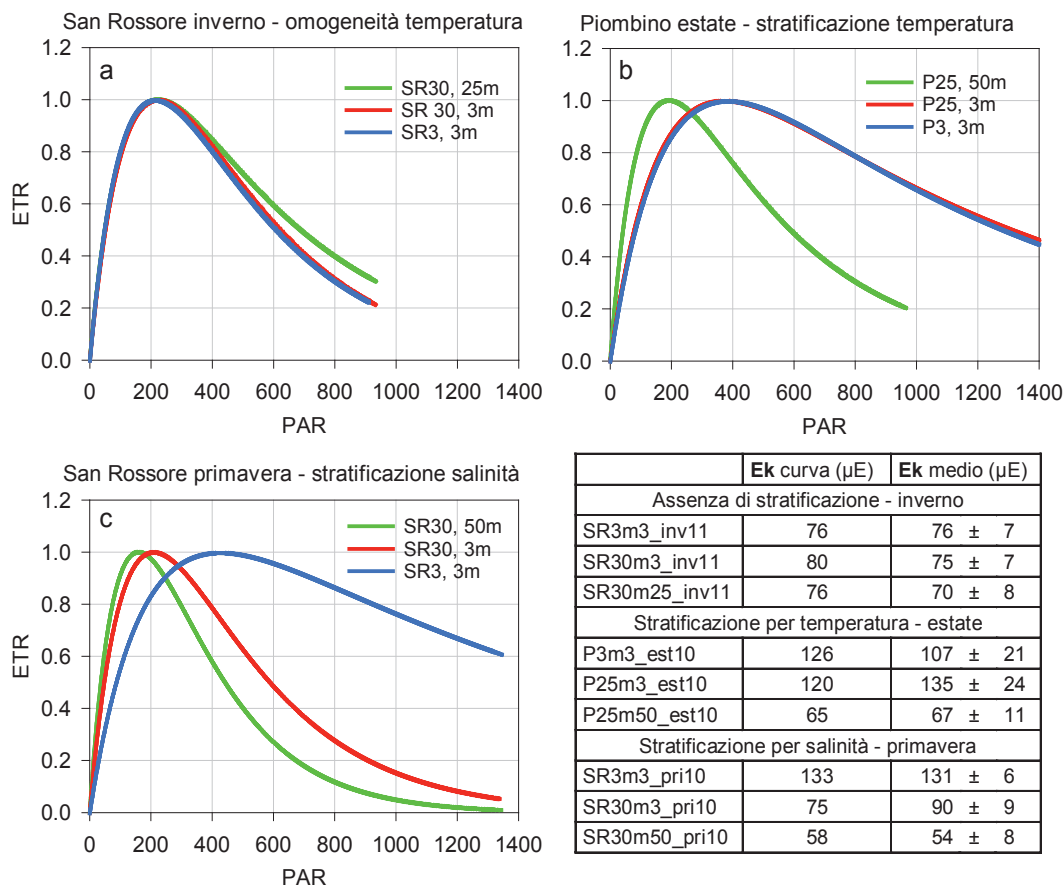


Fig. 6.6. Curve fotosintetiche dei popolamenti fitoplanctonici della costa toscana in tre diverse condizioni di colonna d'acqua: (a) invernale rimescolata, (b) estiva stratificata e (c) primaverile con stratificazione costiera da salinità. Il parametro di fotoadattamento E_k viene riportato in tabella nelle tre diverse condizioni di colonna, come ottenuto sia dalla curva media interpolata che dai singoli replicati. Il comportamento eliofilo ($E_k > 120$) è evidente nel fitoplancton superficiale solo in condizioni di stratificazione.

In Fig. 6.6 sono mostrate alcune delle curve medie ottenute per interpolazione da 4 replicati. Le curve invernali di San Rossore risultano omogenee: alpha e P_{max} coincidono e gli E_k sono simili (76-80 $\mu E m^{-2} s^{-1}$) indicando così che i popolamenti superficiale e profondo, costiero e del largo sono tutti adattati alle condizioni di bassa irradianza invernali (curve sciafile) in una colonna d'acqua rimescolata (omogenizzazione termica) dove gli organismi trascorrono molto tempo anche alle profondità elevate. Al contrario durante l'estate, in conseguenza della stratificazione termica, gli organismi fitoplanctonici di superficie vengono mantenuti in acque ben illuminate ed infatti le curve P-E dei 3 m risultano eliofile (E_k 120-126 $\mu E m^{-2} s^{-1}$), quella profonda (P25 50 m) è invece

sciafila (E_k 65 $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$) con pronunciate caratteristiche di fotoinibizione. In primavera, solo il campione costiero SR3 3 m, che risulta confinato in superficie per una stratificazione alina, appare fotoadattato a condizioni eliofile (E_k 133 $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$) mentre quello profondo risulta decisamente sciafilo. In tabella vengono riportati come valori sintetici ed esemplificativi dei pararametri fotosintetici, quelli degli E_k nelle varie condizioni di foto-adattamento, al fine di una loro implementazione negli specifici algoritmi di calcolo della PP dei mari toscani, utilizzando dati tele-rilevati (Lazzara et al., 2010a).

I valori di rendimento fotosintetico (Yield) più elevati sono stati misurati in inverno con valori >0.6 che indicano il raggiungimento di un'efficienza di fotosintesi potenziale massima (condizioni ottimali dell'apparato fotosintetico), al contrario i minimi sono solitamente estivi (<0.4 , estate 2011) e probabilmente legati a condizioni di limitazione nutritiva e/o di stress luminoso, oltre che alle basse concentrazioni di clorofilla.

6.2.4.4. Analisi delle proprietà bio-ottiche

Lo studio delle proprietà ottiche delle acque antistanti la Toscana è stato rivolto ad un loro inquadramento rispetto alle acque Mediterranee e rispetto alle classificazioni ottiche esistenti, e finalizzato alla possibilità di miglioramento delle stime satellitari dei principali componenti marini otticamente attivi e cioè di fitoplancton NAP e CDOM. Ipotizzando inoltre anche la possibilità della messa a punto di un modello semianalitico che descriva le relazioni quantitative fra concentrazioni delle sostanze otticamente attive, le proprietà ottiche inerenti ed il colore del mare. Per questo sono stati studiati: 1) i rapporti fra gli assorbimenti e/o le concentrazioni delle sostanze otticamente attive con Chl in quanto stima della biomassa fitoplanctonica; 2) la variabilità degli assorbimenti specifici di fitoplancton NAP e CDOM; 3) le proprietà ottiche del mare quali l'attenuazione e la riflettanza spettrale in relazione alle sostanze otticamente attive.

6.2.4.4.1. Relazioni fra zona eufotica e concentrazione media di Chl

La profondità della zona eufotica (z_{eu} definita come la profondità alla quale l'irradianza PAR si riduce all'1% di quella superficiale), tenendo conto che in alcune delle stazioni più costiere non è stato possibile determinarla in quanto maggiore del fondale, varia da 22.4 m a SR10 aprile 2010 a 86 m a P 10 di luglio 2011, con una media di 49.1 ± 17.6 . Le relazioni fra z_{eu} e le concentrazioni medie di Chl nella stessa zona eufotica sono state utilizzate per definire operativamente l'appartenenza delle acque al caso 1 o al caso 2 (Morel, 1988). Queste relazioni sono presentate in Fig. 6.7 insieme alla retta di separazione fra le due condizioni (Morel, 1988). I punti si distribuiscono essenzialmente a cavallo della retta di separazione con una leggera maggioranza di punti al di sopra della retta dove si identificano le acque di caso 1 rispetto a quelle di caso 2 che si trovano invece sotto la retta. Le stazioni più costiere a 3 km ed alcune di

quelle a 10 km (specialmente San Rossore e Talamone) stanno sotto la retta mentre quelle a 30 km si collocano sopra. In generale quindi risulta che queste acque appartengono ad una condizione intermedia fra quelle tipicamente di caso 1 e quelle di caso 2. La retta di regressione ottenuta (Fig. 6.7) ha un coefficiente di correlazione molto alto e quindi differente da 0 in maniera altamente significativa e incrocia quella di separazione a concentrazioni medie di Chl di circa 1 mg m^{-3} evidenziando che a concentrazioni superiori le acque tendono ad avere le caratteristiche più tipiche del caso 2, mentre alle concentrazioni più basse le caratteristiche ottiche sono quelle più tipiche delle acque di caso 1.

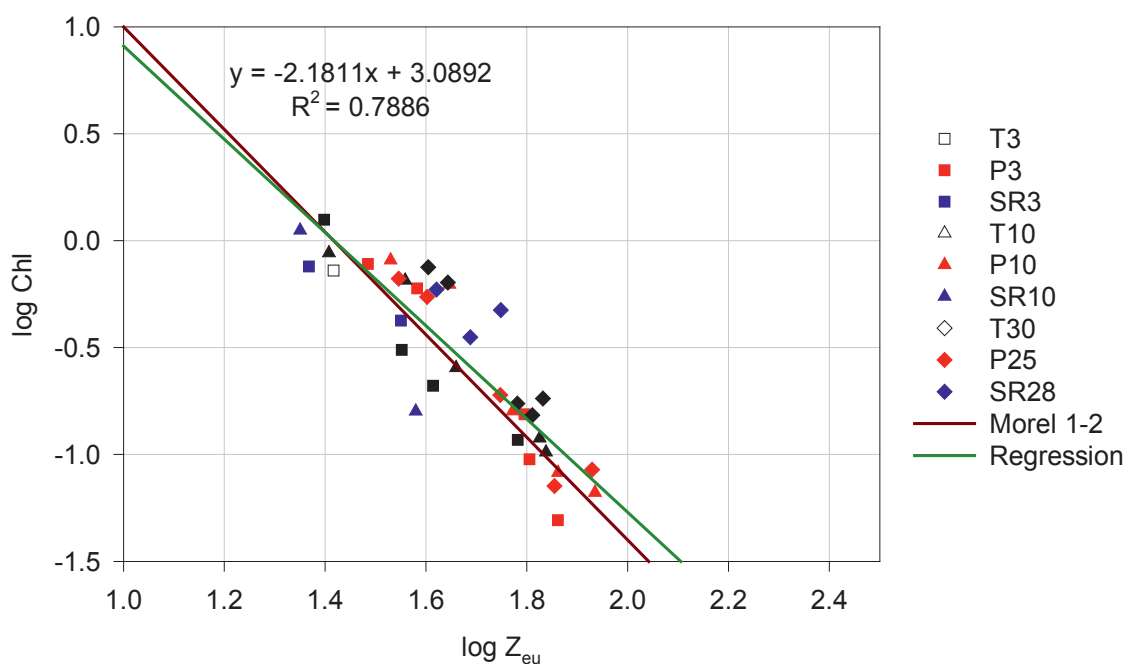


Fig. 6.7. Relazioni fra profondità della zona eufotica zeu (m) e concentrazione media di clorofilla (Chl) nella zona eufotica (mg m^{-3}). Sono riportati i parametri della retta di regressione ed il coefficiente di determinazione R^2 , $N=36$.

6.2.4.4.2. Relazioni fra Chl, SPM e CDOM

Lo studio delle relazioni quantitative fra Chl e le concentrazioni delle sostanze otticamente attive particellate e disciolte risulta un aspetto fondamentale per la caratterizzazione e la classificazione ottica delle acque. In primo luogo perché da un punto di vista ottico fino dagli inizi tutte le classificazioni delle acque sono state incentrate sul ruolo diretto ed indiretto della biomassa fitoplanctonica stimata con Chl, in più Chl può essere utilizzata anche come un indice delle condizioni ecologiche medie degli ecosistemi acquatici.

6.2.4.4.2.1. SPM

Le relazioni fra SPM e Chl nelle acque indagate sono riportate in Fig. 6.8. La concentrazione media di SPM è $1.269 \pm 0.486 \text{ mg L}^{-1}$ con un valore minimo di 0.277 mg L^{-1} alla stazione SR28 50 m di aprile 2010 e massimi molto vicini a 3 mg L^{-1} registrati a T3 in superficie in primavera 2010 e 2011 e a SR28 in superficie in aprile 2011. I valori più alti di SPM generalmente si trovano a SR e T3 e si collocano temporalmente nel periodo inverno- primaverile.

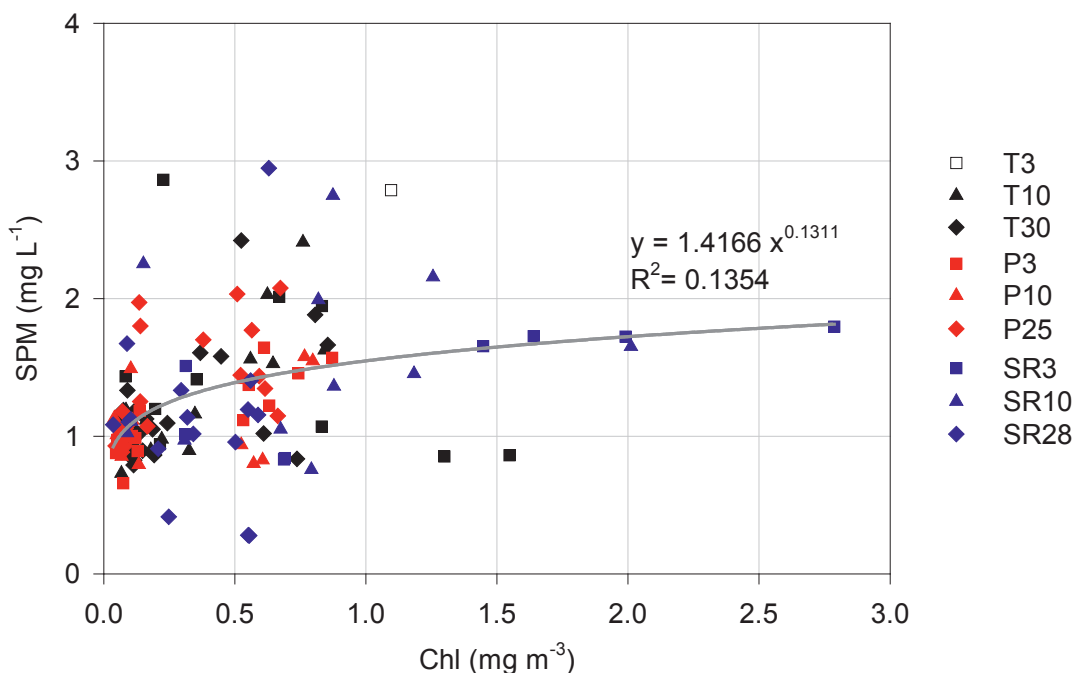


Fig. 6.8. Relazioni fra le concentrazioni di Chl e SPM. Sono riportati i parametri della regressione di potenza ed il coefficiente di determinazione R^2 , $N=137$.

Il rapporto medio SPM/Chl è 4.95 g/mg ed è abbastanza alto (circa il doppio) se confrontato con quello di altre zone costiere del Mediterraneo (Babin et al., 2003). Valori così alti sono già stati trovati per le acque di caso 1 del bacino Mediterraneo e specialmente nelle zone più oligotrofiche dove questo rapporto può essere ancora maggiore (Massi et al., 2011). Nelle acque indagate comunque, questo rapporto risulta alto anche se le concentrazioni medie di Chl (0.427 mg m^{-3}) sono abbastanza alte. La concentrazione di SPM aumenta all'aumentare di Chl, ed i loro rapporti comunque non sono costanti, ma tendono a diminuire all'aumentare di Chl. Questa modalità di variazione è stata interpolata con l'equazione di potenza di Fig. 6.8 il cui coefficiente di correlazione, seppure non altissimo, è diverso da 0 in maniera altamente significativa. I punti che si collocano a maggior distanza dalla curva appartengono essenzialmente al transetto di San Rossore e alle stazioni più costiere di quello di Talamone, campioni per i quali sono molto probabili

significativi apporti terrigeni e fenomeni di risospensione dei sedimenti. Confrontando queste relazioni con quelle di Babin et al. (2003) emerge che, oltre ai già citati alti valori di SPM/Chl, la concentrazione di SPM varia molto di meno al variare di Chl, in particolare perché i valori di SPM a basse Chl risultano alti.

6.2.4.4.2.2. CDOM

In Figura 6.9 sono riportate le modalità di variazione di CDOM in relazione a Chl. La concentrazione di CDOM stimata mediante $a_{CDOM(400)}$ ha un valore medio di $0.0484 \pm 0.0328 \text{ m}^{-1}$, passando da un minimo di 0.0022 m^{-1} alla stazione P3 alla profondità di 10 m a luglio 2011 ad un massimo di 0.184 m^{-1} alla stazione SR3 in superficie ad aprile 2011, e risulta abbastanza differenziata fra le stazioni e le stagioni. In generale le stazioni SR ed in particolare quelle più costiere, influenzate dalle acque del fiume Arno, mostrano gli assorbimenti più alti con i massimi in primavera e inverno. Come si evince dalla Fig. 6.9 $a_{CDOM(400)}$ aumenta con Chl secondo le modalità descritte dall'equazione di potenza della curva interpolante che ha un coefficiente di correlazione diverso da 0 in maniera altamente significativa. La parametrizzazione mostra che CDOM aumenta con Chl, il loro rapporto CDOM/Chl medio risulta $0.159 \text{ m}^2 \text{ mg}^{-1}$ ed aumenta fino a $4.77 \text{ m}^2 \text{ mg}^{-1}$ a basse Chl, mentre ai valori massimi di Chl è $0.0280 \text{ m}^2 \text{ mg}^{-1}$. Questi valori sono molto più bassi rispetto a quelli trovati in alcune acque Mediterranee di caso 2 (Babin et al., 2003). Al contrario i rapporti CDOM/Chl e le loro modalità di variazione sono simili a quelli rilevati da alcuni autori per le acque del largo del bacino Mediterraneo. Massi et al. (2011) hanno proposto una equazione di potenza analoga a quella di Figura 6.9 con esponente simile, ma con il coefficiente di Chl minore. Morel e Gentili (2009), sulla base dell'elaborazione di dati satellitari, hanno descritto l'incremento di CDOM all'aumentare di Chl con una equazione di potenza analoga con il coefficiente di Chl praticamente uguale, ma con esponente maggiore. E' proprio sulla base di questi dati che, gli stessi autori, asseriscono la peculiarità ottica delle acque del Mar Mediterraneo.

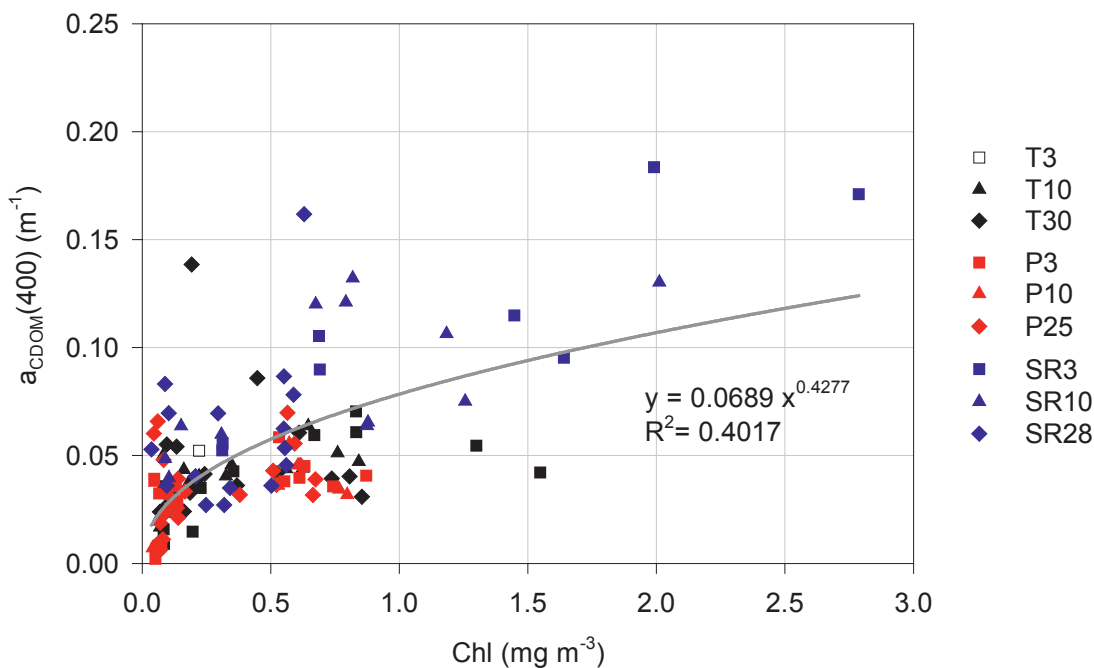


Fig. 6.9. Relazioni fra le concentrazioni di Chl e CDOM. Sono riportati i parametri della regressione di potenza ed il coefficiente di determinazione R^2 , $N=137$.

6.2.4.4.3. Assorbimento del fitoplancton

L'assorbimento del fitoplancton è stato analizzato in relazione alla concentrazione di Chl, calcolando le regressioni a tutte le lunghezze d'onda nel visibile fra 400 e 700 nm utilizzando il modello delle equazioni di potenza. Su questa base è stata successivamente ottenuta la parametrizzazione della variazione dell'assorbimento specifico rispetto a Chl.

Come esempio delle relazioni fra l'assorbimento del fitoplancton e Chl sono riportate in Fig. 6.10 a, b la distribuzione dei punti sperimentali e la relativa regressione alle λ 443 e 675 nm dove il fitoplancton mostra i massimi di assorbimento. Il coefficiente di correlazione è, in entrambi i casi, altamente significativo. L'assorbimento del fitoplancton aumenta con Chl ed il loro rapporto, cioè l'assorbimento specifico, diminuisce all'aumentare di Chl (Fig. 6.10 c, d). I parametri delle equazioni di regressione (Fig. 6.10) sono simili a quelli della parametrizzazione generale per le acque del caso 1 del Mediterraneo (Massi et al., 2011; Organelli et al., 2011).

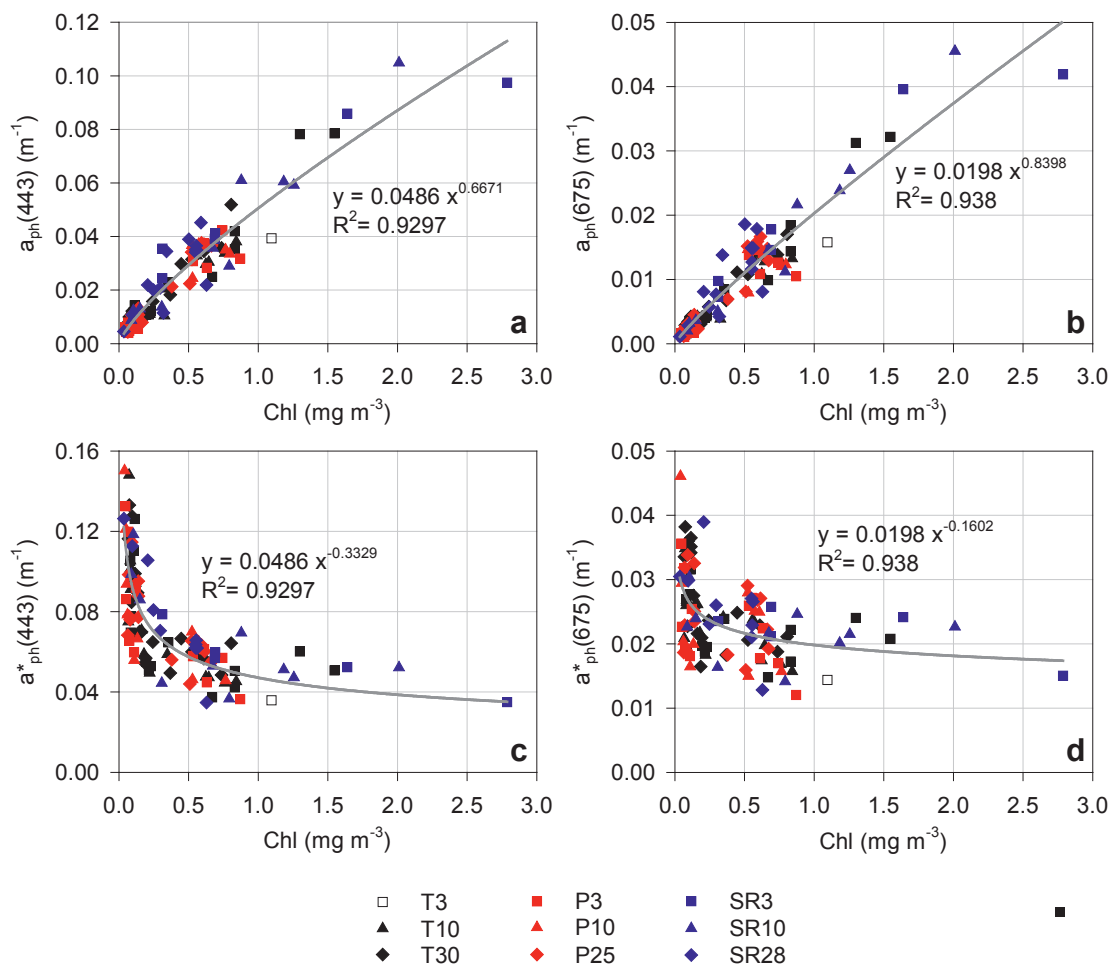


Fig. 6.10. Relazioni fra Chl e l'assorbimento del fitoplancton a 443 nm (a); e 675 nm (b) insieme con quelle dei relativi assorbimenti specifici a 443 nm (c) e a 675 nm (d). Sono riportati i parametri delle regressioni di potenza ed i coefficienti di determinazione R^2 , $N=124$.

Gli spettri di assorbimento specifico del fitoplancton (a^*_{ph} (□)) sono rappresentati in Fig. 6.11 a, dalla quale si evince che a^*_{ph} (443) passa da circa 0.022 a SR10 a 20 m nella primavera 2011, a circa 0.17 $m^2 mgChl^{-1}$ a P10 a 10 m del luglio 2010. Analogamente a^*_{ph} (675) passa da circa 0.01 a 0.045 $m^2 mgChl^{-1}$ con una variazioni di circa 7 volte nel massimo nel blu e circa 4,5 volte nel massimo nel rosso. Per valutare meglio queste modificazioni in Fig. 6.11 b sono riportati lo spettro medio del coefficiente di assorbimento specifico del fitoplancton insieme con lo spettro del coefficiente di variazione. Il CV si mantiene fra 0.42 e 0.52 nella banda spettrale 400-625 nm e diminuisce alle □□ maggiori fino ad un minimo (0.28) corrispondente al massimo di assorbimento nel rosso. Il livello generale del CV può essere essenzialmente spiegato dalle variazioni delle modalità di impacchettamento dei pigmenti nelle cellule e dalle dimensioni cellulari medie (package-effect). Inoltre in alcune bande dello

spettro del CV sono presenti dei massimi corrispondenti ai massimi di assorbimento di alcuni pigmenti accessori (460-470; 500; 560-570; 600; 650 nm). Questi molto probabilmente dipendono dalle modificazioni dei rapporti fra la concentrazione del pigmento e quella della clorofilla a e sono influenzati dalla composizione tassonomica e dagli adattamenti ecofisiologici del fitoplancton (Garver et al., 1994; Bricaud et al., 1995; Sosik et al., 1995). Gran parte della variabilità dell'assorbimento specifico del fitoplancton è comunque spiegata dalla variazione di Chl (Fig. 6.10 c, d).

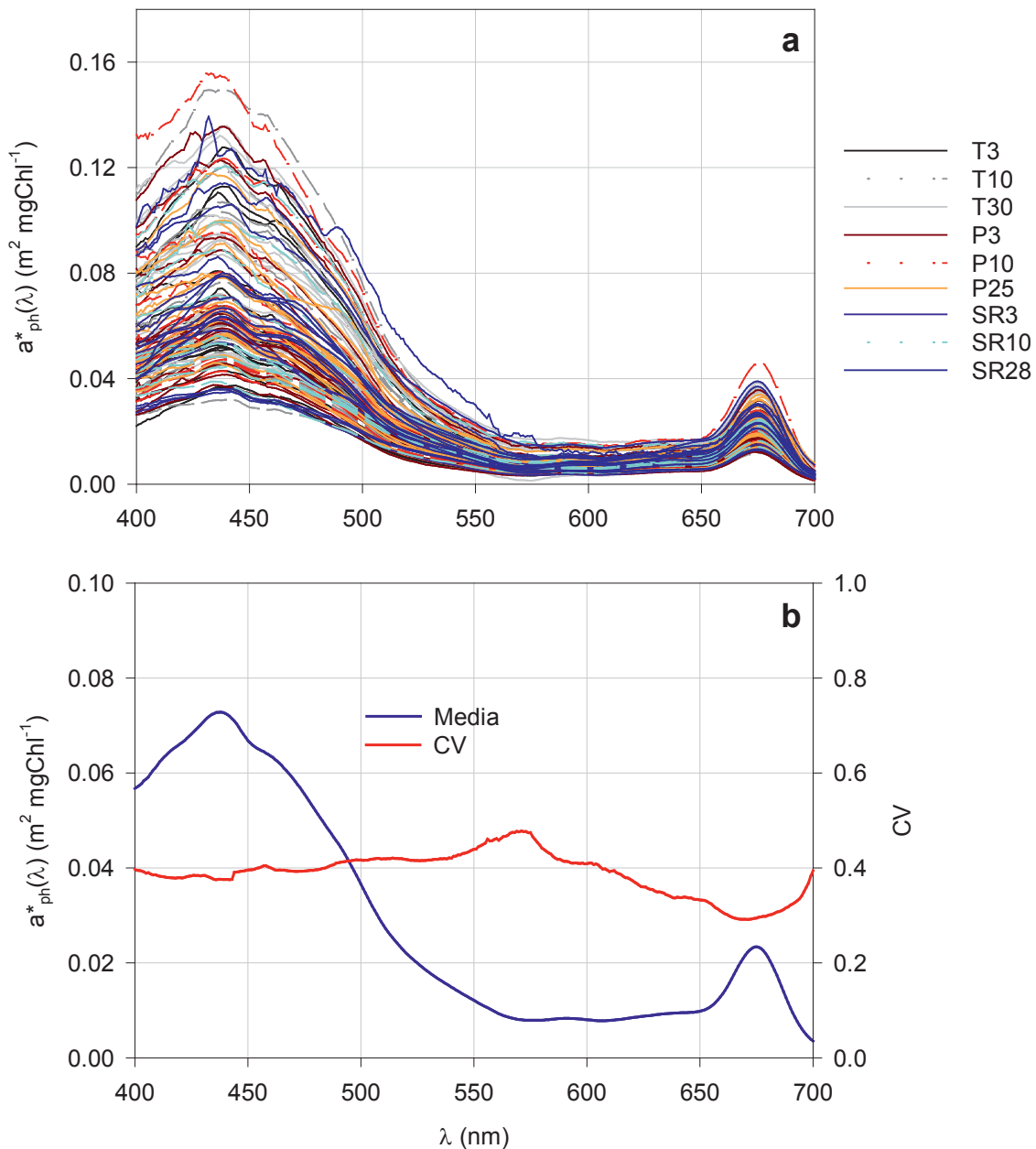


Fig. 6.11. Spettri di assorbimento specifico del fitoplancton (a); spettri della media e del coefficiente di variazione (CV) degli spettri di assorbimento specifico (b).

6.2.4.4.4. Assorbimento del NAP

Analogamente all'assorbimento del fitoplancton anche quello del NAP è stato analizzato in relazione alla concentrazione di Chl, calcolando le regressioni a tutte le lunghezze d'onda nel visibile tra 400 e 700 nm utilizzando il modello delle equazioni di potenza. Per gli assorbimenti del NAP inoltre sono state anche analizzate le relazioni con SPM calcolandone le regressioni alle stesse $\lambda\lambda$. A partire da queste regressioni sono state ottenute le parametrizzazioni della variazione degli assorbimenti specifici del NAP rispetto a Chl e SPM.

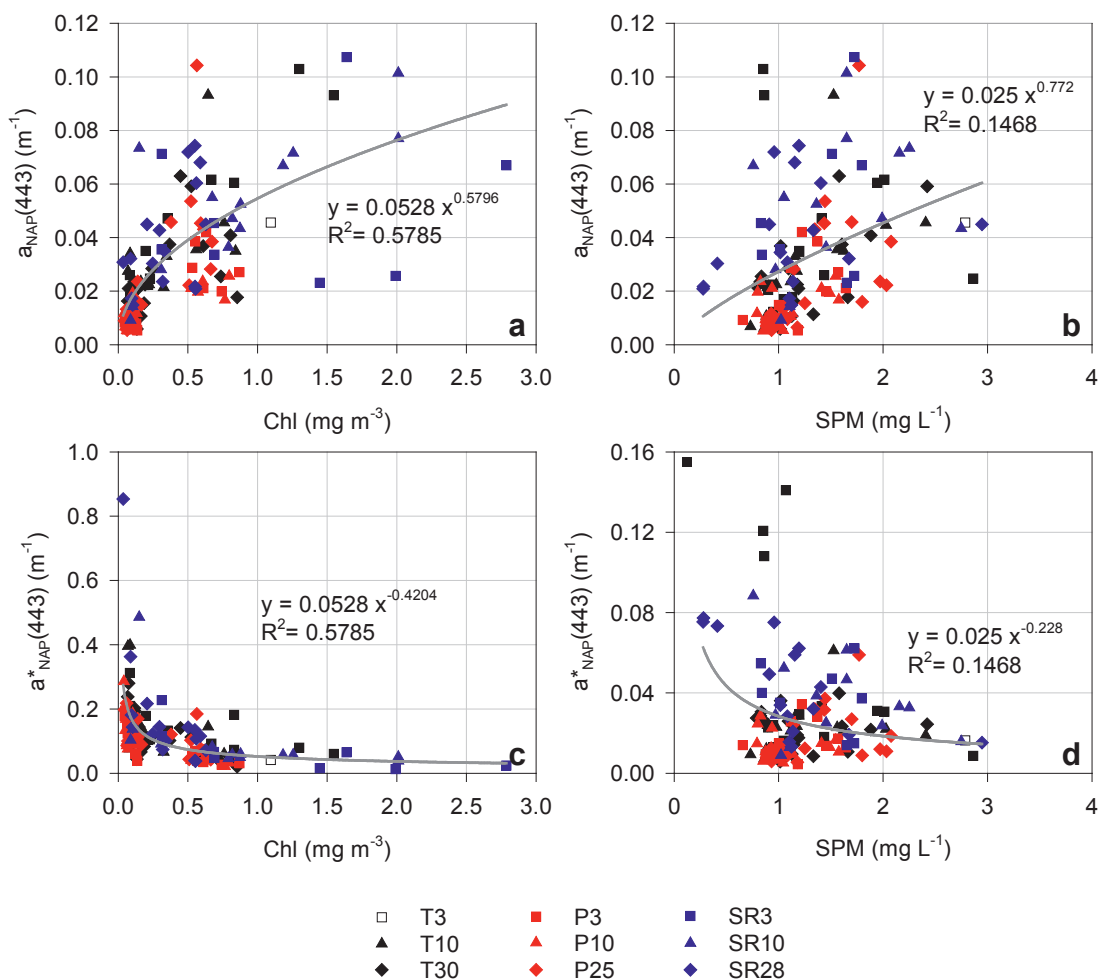


Fig. 6.12. Relazioni fra l'assorbimento del particolato non fitoplanctonico a 443 nm e (a) la concentrazione di Chl, (b) e la concentrazione di SPM. Assorbimento specifico del NAP rispetto a Chl in relazione a Chl (c); assorbimento specifico del NAP rispetto a SPM in relazione a SPM (d). Sono riportati i parametri delle regressioni di potenza ed i coefficienti di determinazione R^2 , $N = 138$.

Le relazioni fra l'assorbimento del NAP con Chl e SPM sono state analizzate a tutte le $\lambda\lambda$, e a titolo esemplificativo, sono riportate quelle a 443 nm, rispettivamente in Fig. 6.12 a e Fig. 6.12 b. L'assorbimento di NAP aumenta in relazione a Chl e SPM secondo le modalità delle equazioni di potenza riportate.

In entrambi i casi sono presenti punti che si collocano distanti dalla curva di regressione che appartengono essenzialmente al transetto SR e alle stazioni più costiere di quello di Talamone. I coefficienti di correlazione risultano entrambi altamente significativi, anche se per la regressione fra $a_{\text{NAP}}(443)$ vs Chl è molto più alto. Da ciò emerge che in queste acque Chl spiega meglio le variazioni di assorbimento $a_{\text{NAP}}(443)$ rispetto a quanto non faccia SPM. Gli assorbimenti specifici del NAP rispetto a Chl e SPM in relazione rispettivamente a Chl ed a SPM (Fig. 6.12 c, d) diminuiscono all'aumentare di Chl e SPM, fra queste le regressioni fra gli assorbimenti specifici del NAP rispetto a Chl vs Chl quelle migliori confermando le considerazioni precedenti.

Gli spettri di assorbimento specifico del NAP ($a_{\text{NAP}}(\lambda)/\text{Chl}$; $a_{\text{NAP}}(\lambda)/\text{SPM}$) sono riportati rispettivamente in Fig. 6.13 a e Fig. 6.13 b. Da entrambe si può avere una idea sia delle variazioni del valore assoluto che delle modificazioni spettrali. La stessa informazione può essere ottenuta in maniera quantitativa analizzando gli spettri medi ed i loro CV (Fig. 6.13 c, d). In entrambi i casi il CV risulta molto alto e con modificazioni spettrali abbastanza contenute, fra 1 e 1.3 negli spettri di assorbimento specifico del NAP rispetto alla Chl, fra 0.8 e 0.86 in quelli normalizzati rispetto a SPM. Questi dati confermano quelli delle acque strettamente costiere del mare della Toscana (Maselli et al., 2009) per l'elevata variabilità poco differenziata alle diverse λ e quindi essenzialmente legata all'ampiezza degli spettri di assorbimento specifico del NAP e non alla loro forma. Come si evince chiaramente dalla regressione di Fig. 6.12 c, gran parte di questa variabilità dell'assorbimento specifico NAP rispetto a Chl è legata alla variazione di Chl stessa.

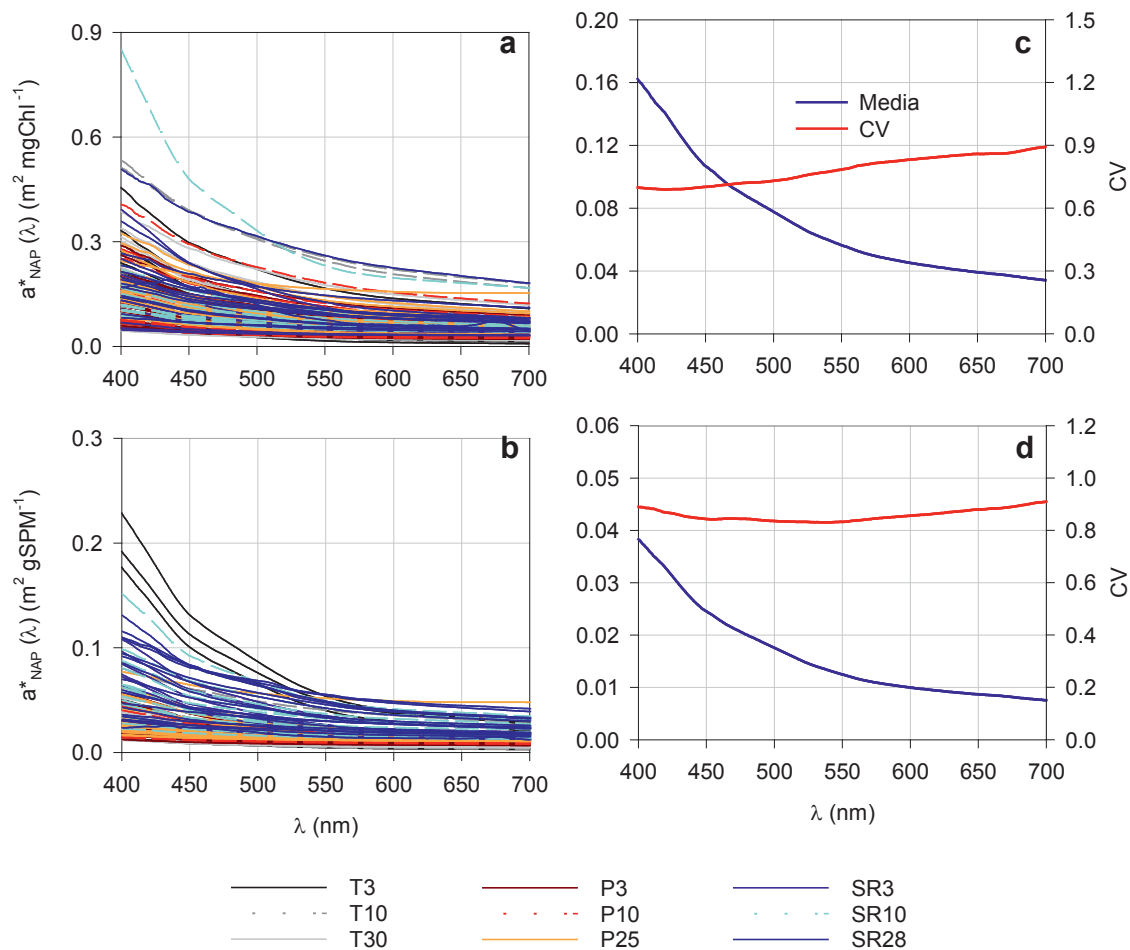


Fig. 6.13. Spettri di assorbimento specifico del NAP normalizzati rispetto alla concentrazione di: (a) Chl; (b) SPM e rispettivi spettri della media e del coefficiente di variazione (CV) (c, d).

6.2.4.4.5. Budget degli assorbimenti dei vari componenti

Una modalità molto utilizzata per rappresentare il contributo all'assorbimento totale dei vari componenti marini otticamente attivi, è quello del diagramma triangolare di Fig. 6.14 nel quale l'assorbimento totale è costituito dalla somma dei contributi di fitoplancton NAP e CDOM. Questo totale è stato calcolato escludendo il contributo dell'acqua pura che risulta costante in termini assoluti. Il bilancio degli assorbimenti alla di 443 nm dei 124 campioni analizzati evidenzia come in queste acque l'assorbimento del fitoplancton non supera in alcun caso il 60 % dell'assorbimento totale, e solo qualche campione del transetto di Piombino in primavera ed inverno supera il 50 %. Similmente anche l'assorbimento della CDOM raramente supera il 50 % del totale (campioni tra 25 e 50 m P3 aprile 2011 e T30 e T10 luglio 2010) ed in un solo campione (T30 35 m di aprile 2011) supera il 60 %. L'assorbimento del NAP è superiore al 60 % in una decina di campioni superficiali e sub-superficiali essenzialmente provenienti dal transetto di Talamone ed in maggioranza appartenenti alle

stazioni T3 e T10 del luglio 2011. Nella maggioranza dei campioni gli assorbimenti sono abbastanza ben distribuiti fra i 3 componenti, o presentano una leggera prevalenza dell'assorbimento del NAP.

Secondo le classificazioni che si basano sul budget di assorbimento (Prieur e Sathyendranath, 1981; Babin et al., 2003; IOCCG, 2000) queste acque, siccome l'assorbimento del fitoplancton non risulta mai essere dominante, sono da classificare come appartenenti al caso 2. Confrontando questa distribuzione del budget degli assorbimenti con quello della precedente indagine effettuata nella stessa zona solo su stazioni a 1 e 3 km dalla costa (Massi et al., 2004) emerge una situazione abbastanza simile, con la maggioranza di campioni in cui i 3 componenti contribuiscono in maniera simile all'assorbimento totale, seppure una frazione maggiore di campioni risultava dominata dall'assorbimento del NAP che in alcuni casi (prevalentemente le stazioni ad 1 Km) raggiungeva valori di oltre 80 % del totale.

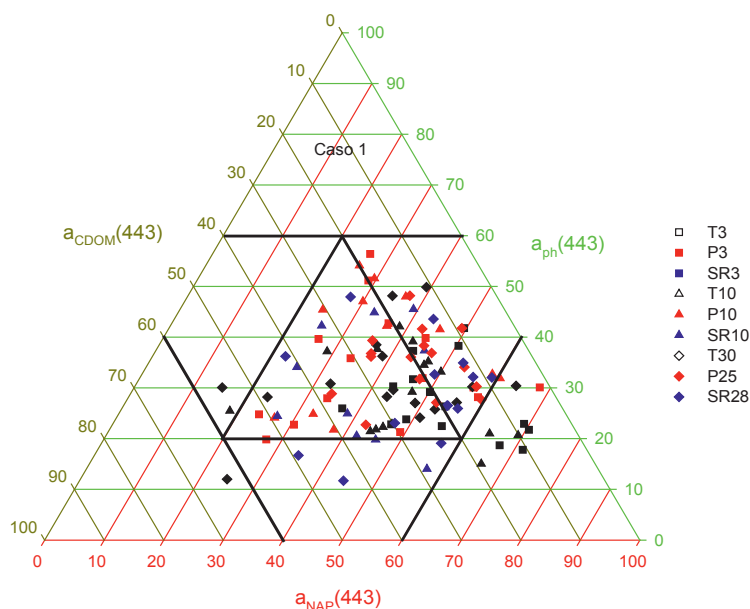


Fig. 6.14. Diagramma triangolare della ripartizione % degli assorbimenti dei 3 principali componenti otticamente attivi, rispetto all'assorbimento totale a cui è stato sottratto quello costante dell'acqua.

6.2.4.4.6. Proprietà ottiche del mare.

Le principali proprietà ottiche del mare quali l'attenuazione dell'irradianza (k) e la riflettanza (R) sono proprietà ottiche apparenti in quanto determinate non solo dalle proprietà inerenti, ma anche dalle condizioni di misura. Queste possono però essere facilmente interpretate (specialmente la riflettanza) in termini di proprietà ottiche inerenti della totalità dei componenti otticamente attivi dell'idrosol marino.

L'attenuazione dell'irradianza (k) risulta sempre minore dell'attenuazione (c , proprietà ottica inerente) che è il risultato della somma di assorbimento (a , proprietà ottica inerente) + diffusione (b , proprietà ottica inerente). Infatti risulta che $k=a+xb$, con $0 < x < 1$. Il suo valore è difficilmente determinabile perché dipendente dalle proprietà diffusive e dalle condizioni di misura. La riflettanza è essenzialmente determinata dal rapporto fra retrodiffusione (b_b , proprietà ottica inerente)/assorbimento. In queste relazioni con a , b , b_b , c sono da intendere come la somma di tutti i contributi dei tre principali componenti otticamente attivi e cioè fitoplancton, CDOM e NAP.

6.2.4.4.6.1. Spettri del coefficiente di attenuazione verticale dell'irradianza nello strato superficiale

Gli spettri di attenuazione verticale dell'irradianza ($k(\lambda)$) misurati nello strato superficiale 0-5 o 0-10 m, approssimabile con quello interessato dal telerilevamento 0- $z_{eu}/4.6$ m, sono stati riportati in Fig. 6.15. Gli spettri di attenuazione sono stati suddivisi in 3 gruppi in relazione alle forme spettrali e ai loro valori assoluti. Nel primo gruppo (Fig. 6.15 a) gli spettri di attenuazione presentano i valori più bassi fra quelli misurati e sono caratterizzati da un andamento abbastanza lineare nella banda spettrale 400-575 nm. Questi spettri appartengono alle acque più oligotrofiche ed in particolare alle stazioni P e T in periodo estivo e in alcuni casi primaverile. Nel secondo gruppo (Fig. 6.15 b) i $k(\lambda)$ hanno valori più alti, e la banda 400-575 nm è caratterizzata da una leggera diminuzione. Fra 575 e 500 nm è presente un minimo più o meno accentuato a partire dal quale si registra un aumento verso i 400 nm. Appartengono a questo gruppo spettri sia con assorbimenti relativamente bassi (stazioni SR estive, T e P primaverili e alcune invernali), sia quelli con assorbimenti alti (T e P e SR invernali), entrambi caratterizzati dalla prevalenza di assorbimento di fitoplancton e soprattutto NAP. Quelli più alti, appartenenti essenzialmente alle stazioni più costiere del transetto di Talamone, presentano una significativa componente diffusiva dell'attenuazione. Gli spettri del terzo gruppo (Fig. 6.15 c), appartenenti tutti alle stazioni SR3 e SR10 in periodo invernale, presentano valori simili a quelli dei più alti del gruppo precedente, ma nella banda 400-575 nm è presente un minimo a circa 575 nm dal quale parte un netto incremento verso le λ inferiori. Si tratta di spettri in cui c'è un assorbimento molto alto e abbastanza ben ripartito fra i tre componenti.

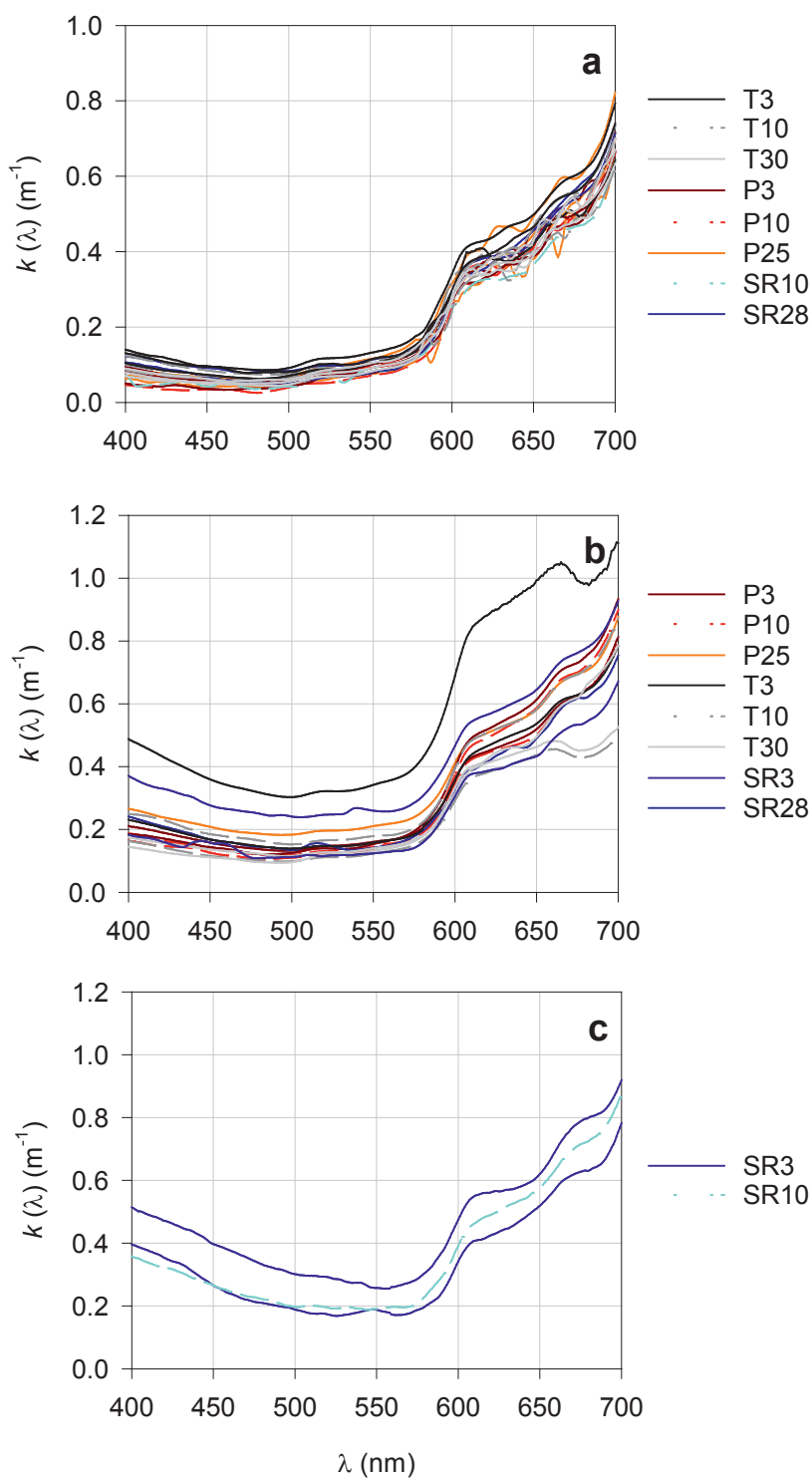


Fig. 6.15. Spettri di attenuazione verticale dell'irradianza nello strato superficiale interessato dal telerilevamento (0-Z_{eu}/4.6) suddivisi in gruppi in relazione alla loro forma.

6.2.4.4.6.2. Spettri della riflettanza sub-superficiale

Nella Fig. 6.16 sono stati riportati gli spettri di riflettanza sub-superficiale misurati in situ durante le campagne MOMAR. Gli spettri sono stati suddivisi in 4 gruppi in relazione alla loro forma spettrale che è determinata dal rapporto fra gli spettri di retrodiffusione totale e quelli di assorbimento totale (Morel e Prieur, 1977). Gli spettri di riflettanza del primo gruppo (Fig. 6.16 a) sono caratterizzati da valori massimi minori di 0.05 intorno ai 400 nm, gli spettri si mantengono più o meno costanti o leggermente decrescenti fino a circa 480 nm per poi diminuire più bruscamente fino a circa 520 nm e poi di nuovo fino a circa 600 nm. Questi spettri di riflettanza appartengono alle acque più oligotrofiche e trasparenti in cui sia l'assorbimento del materiale particolato e disciolto, sia quello del fitoplancton sono bassi, così come è bassa la retrodiffusione, si tratta prevalentemente delle stazioni P e T estive. Negli spettri di riflettanza del secondo (Fig. 6.16 b) gruppo si nota che i massimi sono slittati verso λ maggiori fra 450 e 500 nm. Intorno a 400 nm risulta evidente la diminuzione di $R(\lambda)$ in relazione all'incremento di assorbimento di CDOM e NAP. In questo gruppo di spettri compaiono dei massimi a circa 685 nm alcuni anche molto evidenti, si tratta della fluorescenza naturale della clorofilla a (Gordon, 1979). Questi spettri di riflettanza provengono essenzialmente dalle stazioni P e T in primavera. All'aumentare dell'assorbimento di fitoplancton, CDOM e NAP ed anche della retrodiffusione si ottengono gli spettri del terzo gruppo (Fig. 6.16 c) caratterizzati da un evidente massimo intorno a 500 nm, con minimi a circa 400 (in relazione alla significativa presenza di CDOM e NAP che assorbono fortemente in questa banda) e 600 nm. Anche in alcuni spettri di questo gruppo risultano evidenti i massimi a 685 nm legati alla fluorescenza della clorofilla a. Gli spettri, che provengono dalle stazioni T e P più costiere primaverili ed invernali e alcune SR28, pur avendo in generale una forma simile sono caratterizzati da marcate differenze nel valore assoluto dei massimi intorno ai 500 nm, si passa infatti da valori bassi (0.035 a P3 di gennaio 2011) che fanno pensare ad una bassa retrodiffusione, a valori molto più alti (0.1 a SR28 del febbraio 2011), dove al contrario si suppone una forte componente di retrodiffusione. Nell'ultimo gruppo di spettri (Fig. 6.16 d), provenienti tutti dalle stazioni SR3 e SR10, i massimi si spostano ulteriormente in avanti fino a circa 550 nm con valori assoluti che non oltrepassano mai 0.08, mentre i valori a 400 nm sono sempre bassi (0.02-0.03). Si tratta di spettri determinati da un forte assorbimento sia del fitoplancton che di CDOM e NAP. All'interno di ognuno degli ultimi 3 gruppi gli spettri che presentano un netto massimo nel rosso a 685 nm sono anche quelli che raggiungono i valori più alti all'interno del gruppo, indicando che il contributo del fitoplancton alla retrodiffusione risulta sempre significativo.

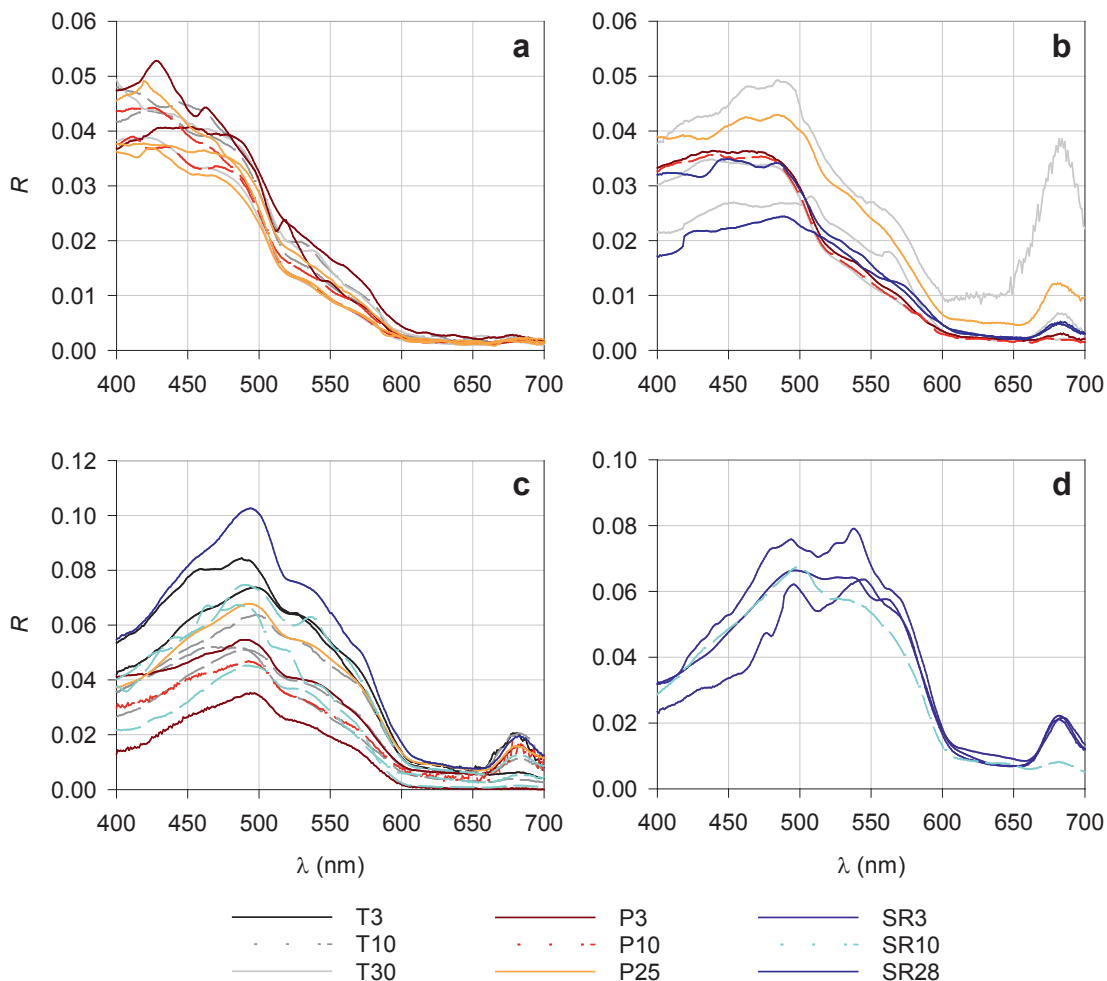


Fig. 6.16. Spettri di riflettanza sub superficiale suddivisi in gruppi in relazione alla loro forma.

In Fig. 6.17 sono riportate le relazioni fra le concentrazioni di Chl e le modificazioni spettrali delle riflettanze valutate mediante il rapporto blu/verde. Queste relazioni sono molto frequentemente utilizzate per stimare Chl dalla riflettanza, negli algoritmi di tipo empirico. La regressione ottenuta ed il suo coefficiente di correlazione, diverso da 0 in maniera altamente significativa, mostrano come, anche per queste acque, si possa stimare Chl a partire dal rapporto blu/verde della riflettanza, sebbene alcuni punti appartenenti alle stazioni costiere SR e T si collochino abbastanza sotto alla retta di regressione probabilmente per elevato assorbimento nel blu legato ad alte concentrazioni di CDOM e NAP. Inoltre sono presenti alcuni punti delle stazioni costiere T e P che si collocano sopra alla retta di regressione, in questo caso si tratta probabilmente di campioni con elevata retrodiffusione. Il coefficiente di regressione e l'ordinata all'origine della retta di regressione sono essenzialmente determinati dalle proprietà ottiche delle sostanze otticamente

attive e dalle proporzioni fra la biomassa fitoplanctonica stimata con Chl e gli altri componenti. Quindi questi coefficienti possono essere diversificati regionalmente e temporalmente, cosicché per un buon algoritmo di calcolo è necessaria una ampia disponibilità di dati provenienti dalla zona e dalle stagioni per le quali si vogliono produrre le stime, ed inoltre gli algoritmi standard più diffusi, che sono stati messi a punto prevalentemente per le acque oceaniche, se applicati in altre zone possono dare stime poco attendibili.

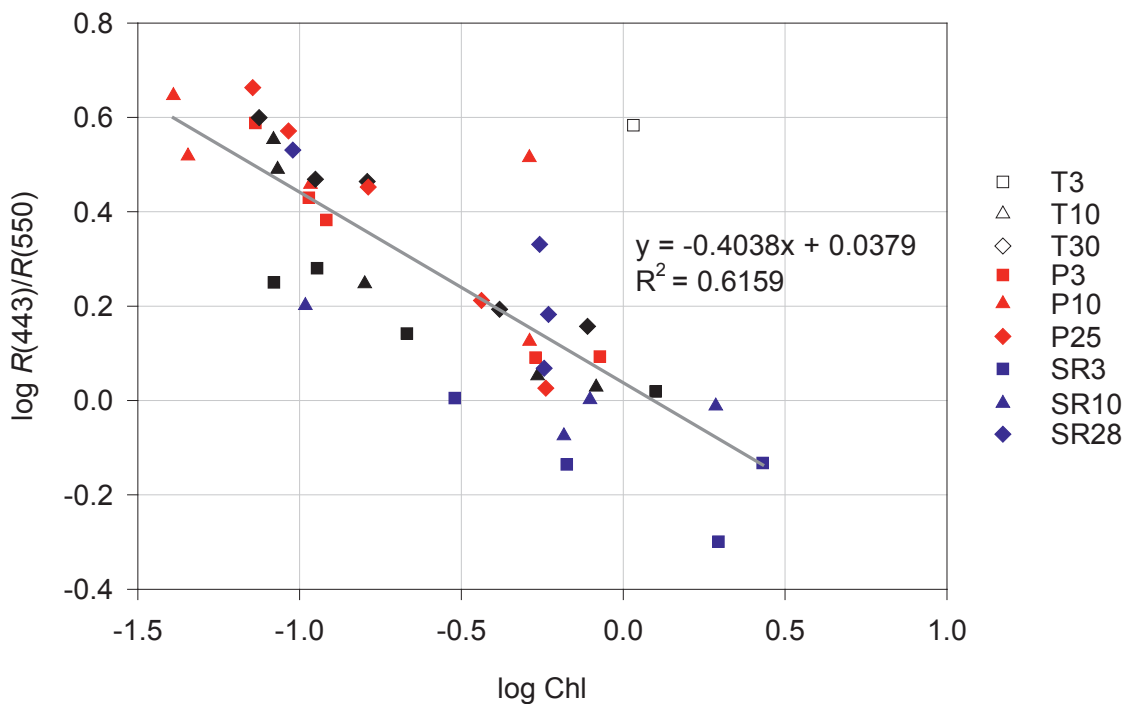


Figura 6.17. Relazione fra i rapporti fra la riflettanza sub superficiali a 443 nm e quella a 550 nm ($R(443)/R(550)$) in relazione a Chl. Sono riportati i parametri della retta di regressione ed il coefficiente di determinazione R^2 , $N=42$.

6.2.4.4.7. Proprietà bio-ottiche: considerazioni conclusive

L'analisi delle proprietà ottiche del mare ed in particolare della riflettanza misurata in situ mostra come le concentrazioni di Chl, CDOM e NAP influenzino soprattutto la forma degli spettri di riflettanza, ma anche i loro valori assoluti. È stato evidenziato che il rapporto fra la riflettanza nel blu rispetto a quella nel verde può essere utilizzato per stimare Chl. Questa modalità di usare i dati di riflettanza, sfruttando il rapporto fra 2 bande spettrali è utilizzata negli algoritmi di tipo empirico, i quali stabiliscono statisticamente delle relazioni fra la riflettanza e la concentrazione dei costituenti basandosi su dati sperimentali contemporanei di concentrazione e riflettanza. Algoritmi di questo tipo sono facili da calcolare e danno risultati stabili. Questi risultati però hanno solo validità locale perché sono molto sensibili ai cambiamenti nella composizione o nei rapporti fra i costituenti, con forti discrepanze regionali e

stagionali. A questo tipo di algoritmi si contrappongono quelli semianalitici basati su un modello teorico semplificato che descrive le relazioni fra i componenti dell'acqua marina ed il colore del mare. La semplificazione, necessaria per poter arrivare ad una inversione ed utilizzazione pratica del modello, consiste nella possibilità di introdurre dati spettrali delle proprietà ottiche inerenti dei componenti marini dell'area da indagare, ottenibili mediante un loro studio statistico preliminare (IOCCG, 2000). In questi casi un modo di procedere abbastanza utilizzato per ottenere le stime delle concentrazioni delle sostanze otticamente attive è quello di minimizzare le differenze fra le riflettanze ottenute dal modello e quelle misurate da satellite, utilizzando procedure di ottimizzazione non lineare (Bukata et al., 1995; Maselli et al., 2009) con le quali si arriva a determinare stime simultanee della concentrazione di tutti i costituenti marini. Il vantaggio di questo modo di procedere sta nell'utilizzazione delle proprietà ottiche inerenti degli specifici componenti l'acqua marina che vengono direttamente accoppiati con il modello teorico della riflettanza, sfruttando tutta l'informazione contenuta negli spettri di riflettanza e non solo quella di alcune bande. I risultati sono generalmente abbastanza accurati quando sono applicati a specifiche aree marine di cui le proprietà bio-ottiche sono conosciute.

Dalla ripartizione degli assorbimenti nel mare toscano risulta che i contributi all'assorbimento totale dei tre maggiori componenti otticamente attivi, fitoplancton, CDOM e NAP, risultano in generale abbastanza simili, e nessun componente (se si escludono alcuni campioni costieri in cui domina il NAP) risulta preponderante e caratterizzante otticamente le acque. Questa condizione è individuata da molti autori come quella che comporta la massima complessità da un punto di vista ottico (IOCCG, 2000) e rende più difficile la possibilità di ottenere buone stime delle concentrazioni di questi componenti e quindi la possibilità di un eventuale realizzazione di un monitoraggio satellitare. Queste difficoltà possono essere superate ampliando il corpo dati regionale al fine di ottenere parametrizzazioni delle relazioni fra le proprietà ottiche e le concentrazioni dei componenti statisticamente più robuste.

Dai risultati ottenuti la classificazione delle acque del mare antistante la regione Toscana e dell'Arcipelago Toscano risulta abbastanza incerta. Secondo la classificazione che si basa sul budget di assorbimento queste acque risultano appartenenti al caso 2 in quanto il fitoplancton non è il componente ottico preponderante. Contemporaneamente risulta che Chl è correlata in maniera altamente significativa con le concentrazioni degli altri componenti otticamente attivi, ovvero che per ogni livello di Chl ne corrisponde probabilisticamente uno di ognuno dei componenti CDOM, SPM e NAP. I criteri generali di appartenenza delle acque al caso 1 prevedono che il fitoplancton sia l'agente ottico preponderante e/o che gli altri componenti otticamente attivi siano covarianti con il fitoplancton stesso, quindi sulla base di questo possono essere valutati i loro contributi (Gordon e Morel, 1983). Questa ultima specifica, verificata per le acque in oggetto, ne determina l'inclusione nel gruppo di quelle

di caso 1. In effetti utilizzando il criterio operativo della classificazione ottica di Morel (1988) si collocano a cavallo dei due tipi.

Da ciò appare evidente che la classificazione ottica di queste acque non risponde al semplice dualismo caso 1 e caso 2. Questa schematizzazione, molto utile per guidare la scelta degli algoritmi di calcolo nei due casi estremi, sembra essere poco utile e superata nelle acque otticamente più complesse come quelle qui indagate (Mobley et al., 2004; Moore et al., 2009; Massi et al., 2011). In queste acque risultano molto più rispondenti alla realtà ed utili ai fini pratici di guidare alla scelta dei differenti algoritmi, quelle di tipo “fuzzy” come ad es. il “SAM indicator” (Massi et al., 2011).

Caratteristica molto importante di queste acque sono gli elevati rapporti medi SPM/Chl e CDOM/Chl, quindi i livelli di SPM e CDOM per una determinata concentrazione di Chl risultano più alti rispetto a quelli tipici delle acque di caso 1. Morel e Gentili (2009) hanno evidenziato che la principale peculiarità ottica delle acque del caso 1 del Mar Mediterraneo rispetto alle acque del caso 1 oceaniche delle stesse latitudini, consiste in una concentrazione circa doppia di CDOM per lo stesso livello di Chl. Le acque del mare antistante la Toscana e quelle dell’Arcipelago Toscano si presentano quindi come un caso a parte di quelle Mediterranee in cui i livelli di CDOM, ma soprattutto di SPM e di NAP rispetto a quelli di Chl sono più alti.

L’assorbimento specifico del fitoplancton è un parametro fondamentale oltre che per gli studi dell’attività foto sintetica (Marra et al., 2007), negli algoritmi di calcolo della concentrazione della clorofilla che si basano su modelli semianalitici, nei quali per lungo tempo è stato introdotto come costante. In realtà da tempo diversi lavori hanno dimostrato la sua variabilità naturale, la quale può essere anche molto elevata sia in valore assoluto che spettralmente (Garver et al., 1994; Cleveland, 1995; Bricaud et al., 1995; Sosik et al., 1995; Bricaud et al., 1998; Oubelkheir et al., 2005). Nelle acque indagate le variazioni all’assorbimento specifico del fitoplancton risultano elevate. Considerando le modalità di variazioni in relazione a Chl quelle emerse risultano simili a quelle delle acque del largo del Mediterraneo (Organelli et al., 2011; Massi et al., 2011) anche se per queste ultime il range di Chl è minore e quindi è minore l’ambito totale di variazione, stesse considerazioni devono essere fatte quando il confronto viene fatto con le acque strettamente costiere del mare antistante la Toscana (Maselli et al., 2009). La elevata variabilità degli assorbimenti specifici del fitoplancton, quindi, può essere spiegata con la differenziazione ambientale delle acque indagate, infatti si passa dalle condizioni tipicamente costiere delle stazioni a 3 Km dalla costa che presentano caratteristiche più mesotrofiche, alle condizioni più simili a quelle del largo come nelle stazioni a 30 Km che si trovano al limite della piattaforma continentale e presentano caratteristiche più oligotrofiche. E’ noto che le condizioni trofiche delle acque influenzano le dimensioni cellulari medie del fitoplancton e la sua composizione tassonomica (Harris, 1986; Reynolds 2006) ed infatti gran parte di questa variabilità

scompare se gli spettri di assorbimento specifico sono riferiti ai diversi livelli di Chl.

Le variazioni dell'assorbimento del NAP sono molto meglio spiegate da quelle di Chl rispetto a quelle di SPM. Gli assorbimenti specifici del NAP rispetto alla Chl mostrano una elevata variabilità dell'ampiezza degli spettri in relazione alle sue possibili differenti origini: terrestre legata all'attività umana o ai processi naturali; marini legati ai processi biologici o alla risospensione di sedimenti. Comunque la maggior parte di questa variabilità scompare se gli spettri di assorbimento specifico del NAP si valutano in relazione al livello di Chl

Le peculiarità ottiche individuate in queste acque sono in gran parte legate alle caratteristiche geomorfologiche ed idrodinamiche dell'area dell'Arcipelago Toscano. Questa area è interessata dalla presenza di un fronte fra le acque liguri a nord e tirreniche a sud la cui posizione varia stagionalmente determinando la prevalenza di acque liguri più fresche in estate e tirreniche più calde in inverno. Queste acque insistono sulla piattaforma continentale (il fondale non supera 200 m) che si estende molto davanti alla costa toscana, costituendo un bacino peculiare con ridotti idrodinamismo (i movimenti prevalenti avvengono in senso rotatorio nel suo interno) e scambi rispetto alla circolazione generale tirrenica e ligure cosicché solo a livello stagionale si determina un ricambio dell'acqua presente nell'Arcipelago (Astraldi et al., 1993). In questa situazione gli apporti dei principali fiumi della Toscana danno un contributo significativo di SPM, CDOM e nutrienti nelle acque superficiali.

Questi contributi influenzano quindi l'ecologia e le proprietà ottiche dell'area, le quali sono in estrema sintesi caratterizzate da due aspetti principali collegati a queste condizioni: i) le concentrazioni dei componenti SPM e CDOM rispetto a quella di Chl risultano elevate, specialmente quelle di SPM, questo determina un sostanziale equilibrio nel contributo di ognuna delle componenti all'assorbimento totale; ii) Chl risulta significativamente correlata con SPM e CDOM, nonostante che non sia il principale componente otticamente attivo.

6.2.5 Le campagne oceanografiche MELBA e Milonga

Le campagne oceanografiche MELBA e Milonga (Misure Lagrangiane OceaNoGrafiche nell'Arcipelago sud toscano) sono state strutturate allo scopo di monitorare la variabilità dei principali parametri oceanografici (temperatura, salinità, correnti marine) e biogeochimici (clorofilla a, CDOM, SPM, fitoplancton, nutrienti) dell'area oggetto dello studio (Figura 6.18). Le più recenti Direttive Quadro europee, la Water Framework Directive (recepita dal D.Lgs. 152/06) e la Marine Strategy richiedono la caratterizzazione dello stato ecologico del mare, e indicano la clorofilla a come un parametro utile per farlo. Un sistema di monitoraggio collaborativo quindi prevede l'integrazione di misure ottenute tramite l'attività di monitoraggio svolta sistematicamente da ARPAT, le attività di modellistica oceanografica e analisi di immagini satellitari sviluppata dal LaMMA.

Il LaMMA ha partecipato direttamente a due di questa campagne: la campagna MELBA, organizzata da Ifremer, e Milonga, organizzata dal LaMMA stesso. Durante le due campagne sono stati effettuati, a fianco delle analisi correntometriche, rilievi biogeochimici utili sia per la caratterizzazione ecologica del mare che per la verifica delle performances degli algoritmi di stima dei parametri biogeochimici da dati satellitari, in particolare la clorofilla a. In Figura 6.18 si riportano le stazioni in cui sono stati fatti rilievi biogeochimici sia per le campagne melba e Milonga che per la campagna MOMAR del CIBM.

La campagna MELBA aveva tre obiettivi principali: raccogliere profili verticali delle correnti per validare modelli idrodinamici nella zona del Canale di Corsica e dell'Arcipelago Toscano, eseguire campionamenti di acqua per l'analisi delle concentrazioni di clorofilla a e infine il carotaggio di sedimenti in alcuni punti predefiniti per l'analisi tossicologica. Nel corso della campagna, iniziata il 1 maggio 2011 e terminata il 19 maggio 2011, i rilievi biogeochimici sono stati effettuati nella settimana dal 1 al 7 maggio 2011, nella zona di mare che va dalla foce dell'Arno verso l'isola di Capraia, fino alla parte nord est della costa di Corsica (Figura 6.18); durante quella settimana sono stati raccolti campioni biogeochimici in 11 stazioni (Tabella 6.3). Campioni di acqua di mare superficiale sono stati raccolti tramite una bottiglia Niskin. L'acqua è stata filtrata nel laboratorio allestito a bordo del catamarano L'Europe (Ifremer) con strumenti di proprietà del Dipartimento di Ecologia Vegetale dell'Università degli Studi di Firenze, per l'analisi quali-quantitativa dei pigmenti algali (Clorofilla a e altri pigmenti algali mediante fluorimetro e spettrofotometro), Assorbimento del particolato, SPM (Suspended Particulate Matter), Colored Dissolved Organic Matter (CDOM); l'acqua è stata anche aliquotata per la determinazione dei nutrienti e per il riconoscimento di specie fitoplanctonica al microscopio. Le analisi sono state poi eseguite nel Laboratorio di Ecologia

Vegetale dell'Università degli Studi di Firenze, e in parte nel laboratorio dell'Ifremer a Tolone (FR).

Gli obiettivi della campagna Milonga, organizzata dal Consorzio LaMMA, sono per la maggior parte comuni a quelli della campagna MELBA, vale a dire affiancare alle metodologie tradizionali (campionamenti biogeochimici, CTD), metodologie innovative (correntometro trainato, strumenti lagrangiani di misura). Nel corso della campagna, che ha previsto una fase preparatoria dal 19 al 23 settembre 2011, una seconda fase dal 10 al 14 ottobre 2011, e una giornata di recupero il 18 ottobre 2011, quattro giornate sono state dedicate ai campionamenti biogeochimici: il 21 e il 22 settembre 2011, il 12 e il 18 ottobre 2011 (Figura 6.18), durante le quali sono stati raccolti 34 campioni biogeochimici (Tabella 6.3). L'area di studio è compresa tra Elba, Montecristo, Pianosa, Giglio, Argentario e la costa grossetana, e i campionamenti biogeochimici sono stati effettuati nella zona dell'arcipelago Toscano tra il golfo di Follonica e la foce dell'Ombrone, l'isola d'Elba, l'isola del Giglio, l'isola di Montecristo e l'Isola di Pianosa, completando così le misure fatte durante la campagna MELBA. Nella campagna Milonga campioni di acqua di mare superficiale e a diverse profondità sono stati raccolti tramite una bottiglia Niskin. L'acqua è stata filtrata nel laboratorio a bordo del battello oceanografico Poseidon (ARPAT) per l'analisi quali-quantitativa dei pigmenti algali (Clorofilla a e altri pigmenti algali mediante fluorimetro e spettrofotometro), SPM, Colored Dissolved Organic Matter (CDOM); l'acqua è stata anche aliquotata per la determinazione dei nutrienti e per il riconoscimento di specie fitoplanctonica al microscopio. Le analisi sono state poi eseguite in parte nel Laboratorio di Ecologia Vegetale dell'Università degli Studi di Firenze, in parte dai laboratori ARPAT, e in parte nel laboratorio dell'Ifremer a Tolone (FR).

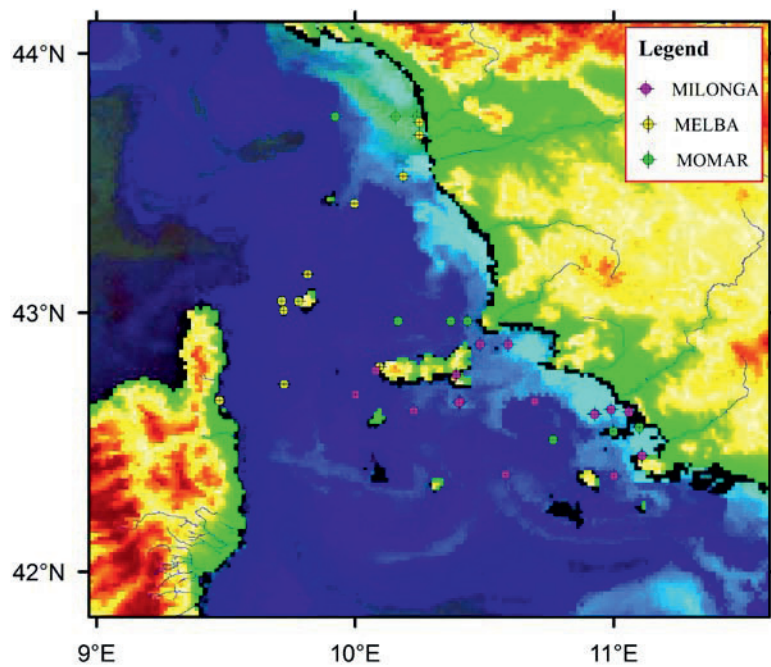


Figura 6.18: Stazioni corrispondenti alle campagne oceanografiche effettuate all'interno del progetto MOMAR.

Tab. 6.3: Date di campionamento e informazioni sulle misure e analisi complessivamente effettuate

Campagne	Date Campagne	Campioni prelevati	Misure <i>in situ</i>
MELBA	02/05/2011	1	CTD Parametri biogeochimici
	03/05/2011	2	
	04/05/2011	2	
	05/05/2011	3	
	06/05/2011	3	
Milonga	21/09/2011	7	
	22/09/2011	3	
	12/10/2011	13	
	18/10/2011	11	
Totali	9	45	
Parametri analizzati			N.ro analisi
nitriti, nitrati, fosfati, silicati			45
clorofilla a			45
particellato sospeso (SPM)			21
sostanza organica disciolta (CDOM)			21
diversità pigmentaria			45
composizione tassonomica fitoplancton			45
Totale analisi			222

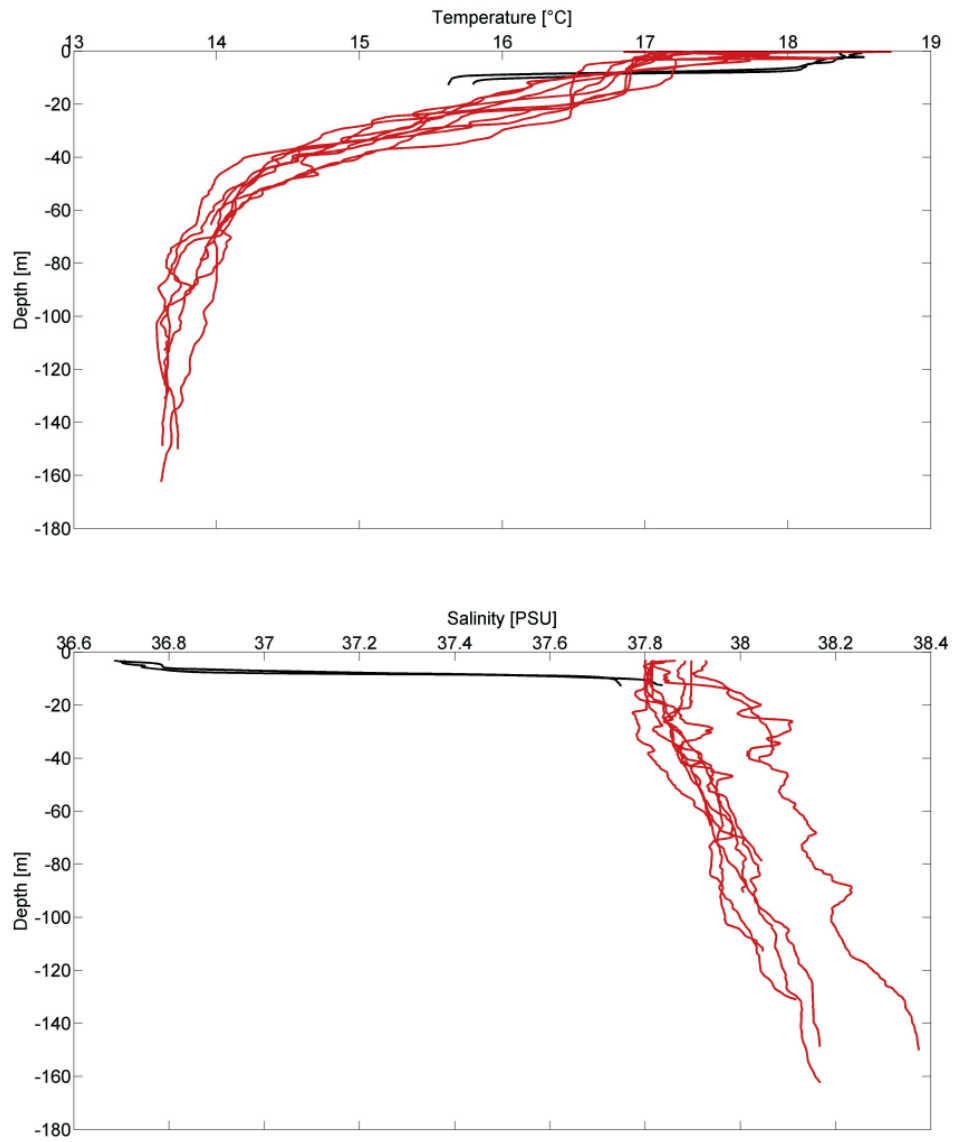


Figura 6.19: profili di temperatura e salinità misurati durante le campagna MELBA.

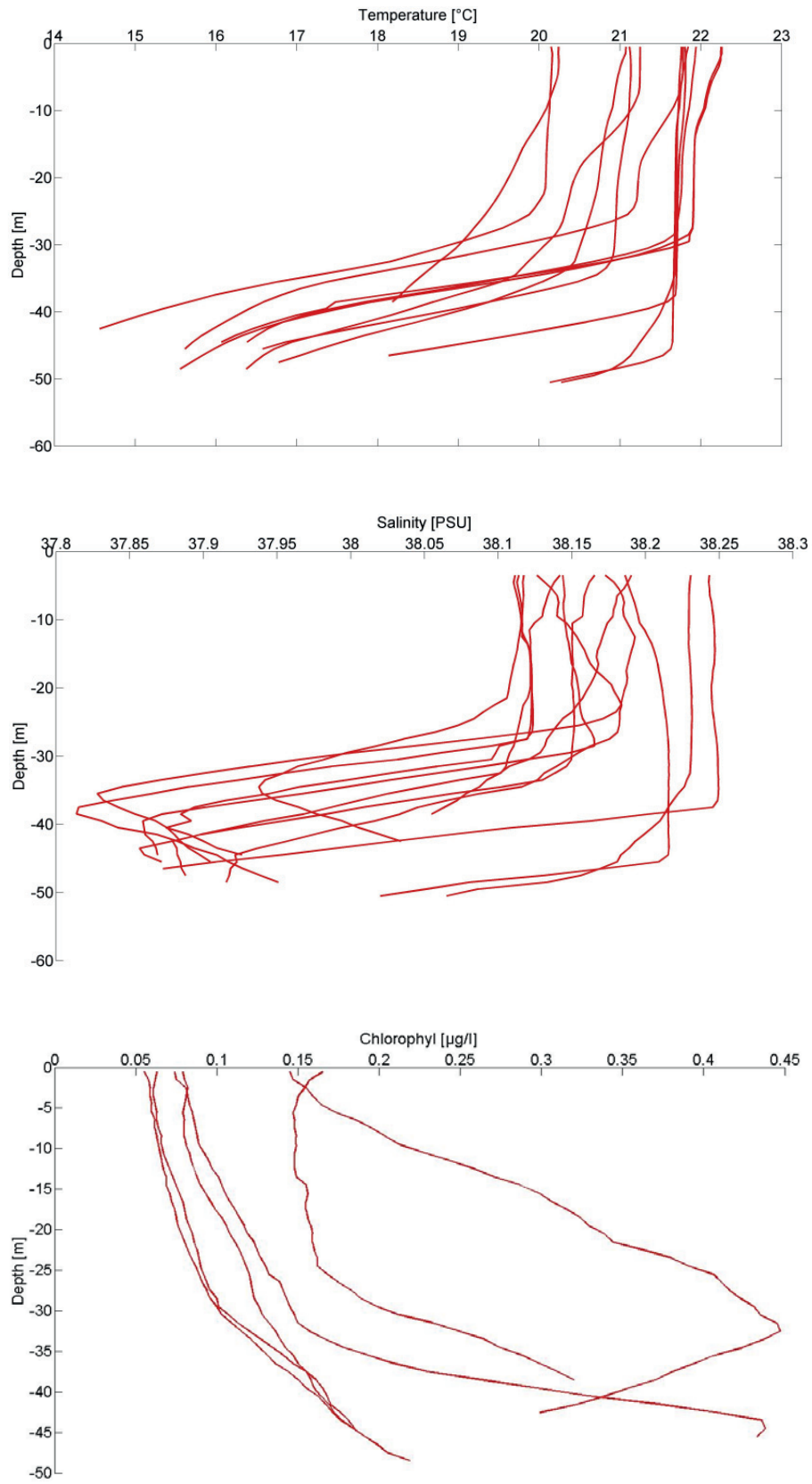


Figura 6.20: profili di temperatura, salinità e clorofilla misurati durante la campagna Milonga

I profili CTD della campagna MELBA (Figura 6.19) mostrano il classico andamento di temperatura e salinità relativo al mese di maggio in condizioni meteo marine buone. È evidente la presenza del termoclino che è graduale e si estende dalla superficie fino a circa 60 m, che indica l'inizio della formazione di uno strato omogeneo superficiale. Il grafico che riporta la salinità e anche quello che riporta la temperatura mostrano due profili, in nero, presi alla foce dell'Arno e alla foce del Serchio: è evidente come in questo caso la salinità è molto bassa in superficie, a causa dell'apporto di acqua fluviale dolce, le temperature variano poco, i profili sono poco profondi a causa del fondale basso (13 m). Gli altri profili di temperatura mostrano come differenze di temperatura maggiori siano in superficie, dai 17 ai 18.5 °C.

I rilievi biogeochimici nella zona di studio della campagna MELBA mostrano valori di nutrienti e SPM in linea con quanto ci si attende nel periodo primaverile, mentre i valori medi di clorofilla a, e specialmente di CDOM, sono più alti di quanto ci si aspetta: ciò potrebbe essere dovuto alle tre stazioni costiere, che fanno parte delle 11 totali, una davanti al porto di Livorno, le altre due alle foci dell'Arno e del Serchio, aree in cui in effetti l'apporto di CDOM fluviale è elevato.

I profili CTD della campagna Milonga (Figura 6.20) mostrano come la temperatura varia a tutte le profondità esaminate e non solo in superficie, come avviene invece con i dati della campagna MELBA. L'andamento dei profili di clorofilla è in linea con quanto ci si attende nel periodo. È evidente un termoclino profondo (da 30 a 45 m) che separa uno strato superficiale rimescolato (UML) in cui temperatura e salinità variano poco. Questi andamenti potrebbero essere spiegabili con le condizioni meteo marine non buone nel periodo immediatamente precedente la campagna, e supportati da alcuni dati relativi ai rilievi biogeochimici (Tabella 6.4): nell'area di campionamento infatti il valore medio di SPM è insolitamente alto (2.164 mg L⁻¹) soprattutto se messo in relazione alla concentrazione media di clorofilla a (0.184 mg m⁻³) che ci si aspetterebbe superiore in associazione con una concentrazione di SPM così alta. La ragione per cui il valore di SPM è così alto potrebbe risiedere proprio nelle condizioni meteo marine che hanno preceduto la campagna non buone, per cui il fondale sabbioso che caratterizza l'area su cui si è svolta la campagna Milonga è stato rimescolato e la sabbia che è salita verso la superficie potrebbe essere responsabile del valore alto di SPM. Ciò potrebbe essere supportato anche dal valore alto del silicio (3.4 μM), che potrebbe essere causato proprio dalla presenza di sabbia. I valori di CDOM sono in linea con quanto ci si aspetta nella zona in studio alla fine della stagione estiva, come anche quelli di clorofilla a (determinata per spettrofotometro). I valori di fosforo e azoto rientrano nei range previsti nel periodo.

Per i campioni prelevati durante la campagna oceanografica MELBA è stato effettuato il riconoscimento di specie fitoplanctonica, che tramite

l'identificazione e conta di specie individuate come tossiche, ha mostrato che in nessun caso siamo in presenza di bloom.

Tab. 6.4. Concentrazioni medie (\pm dev. st.) di nutrienti (μM), clorofilla *a* (mg m^{-3}), particolato sospeso (SPM, mg L^{-1}) e sostanza organica disciolta (CDOM, m^{-1}). DIN= NO_2+NO_3 .

Campagna.	SiO ₂	PO ₄	DIN	Chl <i>a</i>	SPM	CDOM
MELBA	1.1571 \pm 0.28	0.096 \pm 0.05	0.2623 \pm 0.28	0.208 \pm 0.15	1.339 \pm 0.68	0.255 \pm 0.21
Milonga	3.4 \pm 0.9	<0.2	<0.2	0.184 \pm 0.16	2.164 \pm 1.19	0.061 \pm 0.03

Allo scopo di affiancare, nel monitoraggio marino nell'area di studio, i dati satellitari ai dati in situ classicamente utilizzati, è stato effettuato il confronto tra i dati in situ di clorofilla *a* (nella prima quota ottica del mare, la profondità entro la quale il satellite è in gradi di "vedere") raccolti nel corso delle tre campagne e la riflettanza satellitare in situ. I dati di clorofilla *a* sono utili per verificare le performances dei 4 algoritmi per la clorofilla *a* presi in esame nell'area di studio MOMAR: OC3M, MedOC3, OC5 e SAM_LT.