

Progetto Finalizzato:
CAMBIAMENTI CLIMATICI E AGRICOLTURA – CLIMAGRI
Sottoprogetto 3: Siccità, desertificazione e gestione delle risorse idriche. Linea di Ricerca 3.3
Titolo della Ricerca

**MODELLO PREVISIONALE DELLE CONSEGUENZE DELL'AUMENTO DELLA
TEMPERATURA E DELL'IRRADIANZA ULTRAVIOLETTA SULLA DINAMICA DI
POPOLAZIONI ZOOPLANCTONICHE DI INTERESSE IN ACQUACOLTURA**

PF "CLIMAGRI" 2° anno di attività DM 337/7303/00 del 31/07/2002

responsabile: Dr. Maurizio Severini (ISAC – CNR)

Relazione tecnico-scientifica sull'attività svolta nel corso del Secondo Anno
(dal 01/10/2002 fino al 31/12/2003)

INTRODUZIONE

L'oggetto di studio della nostra Unità di Ricerca (UR) è un *modello di simulazione* della dinamica di sviluppo e di accrescimento di *popolazioni zooplanctoniche* negli stadi giovanili del *ciclo vitale*. Le caratteristiche di base del modello sono state descritte dettagliatamente nella Relazione tecnico-scientifica del Primo Anno. Qui vengono riportate sinteticamente. Il ciclo vitale delle popolazioni zooplanctoniche (*peciloterme*) in relazione all'andamento della temperatura e dell'irradianza UV viene simulato tramite due modelli: un *modello matematico* ed un *modello biologico*. Il modello matematico è un modello *compartimentale*. Ciascun compartimento rappresenta uno *stadio* (o *fenofase*) k del ciclo vitale ed è caratterizzato: dalla *densità di popolazione* $N_k(t)$ (funzione di stato), dalla temperatura $T(t)$ (funzione forzante) e dai flussi degli individui in ingresso ed in uscita dallo stadio $R_{k-1}(t)$, $R_k(t)$ legati tra loro da un sistema di H equazioni differenziali lineari del primo ordine noto come *Modello a Ritardo Distribuito* ('Distributed Delay Model) o DDM (Manetsch, 1976).

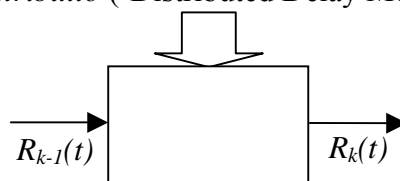


Figura 1 Schema di base del modello a ritardo distribuito DDM.

Il modello biologico è una popolazione di riferimento che si sviluppa in condizioni controllate di temperatura, radiazione, alimentazione, ecc. la cui densità $N_k(t)$ nei diversi stadi del ciclo vitale viene osservata giornalmente.

Nel corso del primo anno è stata sviluppata la versione del modello matematico DDM da applicare a popolazioni che si sviluppano a temperatura costante, detta invariante nel tempo ('Time Invariant') o DDM-TI. Questa è particolarmente adatta per simulare la dinamica di *coorti* di popolazioni biologiche che si sviluppano in ambiente controllato. Per quanto riguarda il modello biologico, sono stati condotti esperimenti di laboratorio su coorti di popolazioni delle specie *Xenopus laevis* (Anfibi) e *Artemia franciscana* (Anostraci) che hanno suggerito una prima classificazione degli stress dell'ambiente fisico sulla dinamica delle popolazioni biologiche basata sui risultati del modello DDM-TI in: a) no-stress, b) stress blando, c) stress sub-letale, d) stress letale.

ATTIVITA' DEL SECONDO ANNO (Anno 2003).

a) Modello matematico.

Nel secondo anno, partendo dal lavoro di base (Vansickle, 1977), è stato introdotto anche nel DDM da noi elaborato, un flusso d'individui $D_k(t)$ che simula la *mortalità intrinseca* della popolazione nello stadio k del ciclo vitale ed è stata sviluppata una versione del DDM da applicare a popolazioni zooplanctoniche che vivono in acqua a temperatura variabile, detta variabile nel tempo ('Time Varying Delay') o TVD.

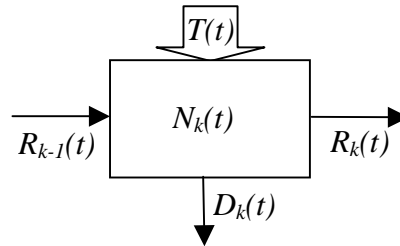


Figura 2 Schema del modello a ritardo distribuito con mortalità.

L'introduzione della temperatura variabile ha reso necessaria la risoluzione per via numerica del sistema di equazioni differenziali del TVD

$$r_h(j) = \frac{H}{DEL_k(j-1)} \cdot r_{h-1}(j-1) + \left[1 - \frac{H}{DEL_k(j-1)} + \frac{DEL_k(j) + [D_k - 1] \cdot DEL_k(j-1)}{DEL_k(j-1)} \right] \cdot r_h(j-1)$$

Il significato della maggior parte delle variabili che compaiono nel sistema di equazioni (per $h = 1, 2, \dots, H$) è stato chiarito nella Relazione del Primo Anno. Si deve solo aggiungere che $DEL_k(j)$ indica il *ritardo istantaneo* del giorno j -esimo in relazione alla temperatura media giornaliera (variabile da giorno a giorno) $T(j)$ e che il flusso di mortalità $D_k(t) = D_k \cdot N_k(t)$ dove D_k è detto *tasso di mortalità intrinseca* (considerato, per ora, costante).

Questa nuova versione del modello ha un campo di applicazione molto più esteso della prima ed è potenzialmente in grado di simulare nello stesso tempo la fenologia e la demografia di tutte le popolazioni peciloterne vegetali ed animali in natura (in relazione all'ambiente fisico). Esso, inoltre, dipendendo dalla temperatura come funzione forzante, risulta particolarmente adatto per simulare (e prevedere) l'impatto di un eventuale aumento della temperatura media sulle popolazioni naturali. Il modello TVD è stato formulato inizialmente per una sola coorte di popolazione in ingresso; nel corso del secondo anno, la nostra UR ne ha realizzato una versione in grado di operare con un sistema *multi-coorti* (cioè con qualunque andamento del flusso d'individui) in ingresso.

Infine, riportando in ingresso i flussi d'uscita ed introducendo tra uscita e (nuovo) ingresso due nuovi parametri: il *tasso di riproduzione* Q ed il *tasso di sopravvivenza* S , è stato realizzato un nuovo modello: il *Simulatore di Ritardo* ('Delay Simulator') DS, in grado di simulare la dinamica di popolazioni *multivoltine*, cioè di popolazioni che nella stessa stagione formano più generazioni (Figura 3). Quando le generazioni si sovrappongono, il simulatore è in grado di calcolare il contributo alla densità di popolazione da parte delle diverse generazioni, contributo che non è possibile stimare tramite osservazioni dirette (a meno di ricorrere a complicate operazioni di marcatura). Il modello DS 'gira' su *personal computer* ed è stato implementato nel *foglio di calcolo* elettronico Microsoft Excel per renderlo di facile impiego anche per eventuali utenti non esperti in matematica numerica. Un esempio schematico del DS nella pagina del foglio di calcolo è riportato nella Figura 4.

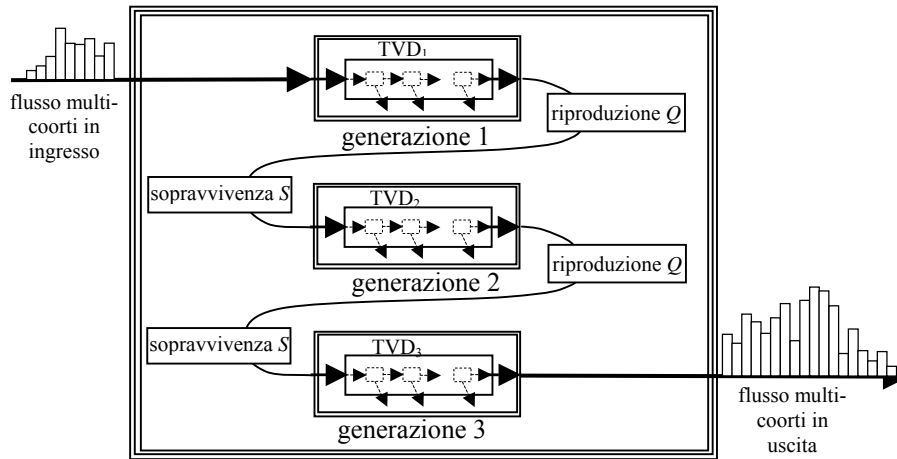


Figura 3. Schema di base del Simulatore di Ritardo ('Delay Simulator') DS. Ciascun rettangolo dell'istogramma 'flusso multi-coorti in ingresso' rappresenta una coorte di popolazione che entra giornalmente nel primo TVD (TVD_1) che simula la prima generazione. Ciascuna coorte transita attraverso gli stadi del primo DDM (ad una velocità dipendente dalla temperatura) e ne esce dallo stadio di maturazione, cioè quando i suoi individui sono in grado di riprodursi. Ciascuna femmina matura (circa il 50% degli individui maturati) genera nuovi nati secondo il tasso di riproduzione Q , ma non tutti contribuiscono alla seconda generazione. Alcuni muoiono per difetti genetici, altri perché trovano un ambiente fisico inadatto, altri infine (e sono probabilmente il maggior numero) perché cibo per predatori. Il tasso di sopravvivenza S tiene conto di questa mortalità. Applicando successivamente il tasso di riproduzione ed il tasso di sopravvivenza alle coorti in uscita dalla prima generazione si calcola il flusso multi-coorti in ingresso della seconda. Lo sviluppo nella seconda generazione viene simulato con un modello TVD_2 uguale a quello usato per la prima, e così via. Lo schema in figura rappresenta una popolazione che in una stagione compie tre generazioni, ma può essere usato per qualunque popolazione peciloterma con un qualunque numero di generazioni.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	N	O
1																				
2		Parametri					TVD1					Riproduzione 1	TVD2					Riproduzione 2		
3																				
4												riprod	soprav						riprod	soprav
5	0	T(0)	DEL(0)	W(0)	AA(0)	BB(0)	r_{00}	r_{01}	r_{02}	...	r_{0H}			r_{00}	r_{01}	r_{02}	...	r_{0H}		
6	1	T(1)	DEL(1)	W(1)	AA(1)	BB(1)	r_{10}							r_{10}						
7	2	T(2)	DEL(2)	W(2)	AA(2)	BB(2)	r_{20}							r_{20}						
8	3	T(3)	DEL(3)	W(3)	AA(3)	BB(3)	r_{30}							r_{30}						
9	4	T(4)	DEL(4)	W(4)	AA(4)	BB(4)	r_{40}							r_{40}						
10	5	T(5)	DEL(5)	W(5)	AA(5)	BB(5)	r_{50}							r_{50}						
11	6	T(6)	DEL(6)	W(6)	AA(6)	BB(6)	r_{60}							r_{60}						
12	7	T(7)	DEL(7)	W(7)	AA(7)	BB(7)	r_{70}							r_{70}						
13	8	T(8)	DEL(8)	W(8)	AA(8)	BB(8)	r_{80}							r_{80}						
14	9	T(9)	DEL(9)	W(9)	AA(9)	BB(9)	r_{90}							r_{90}						
15	10	T(10)	DEL(10)	W(10)	AA(10)	BB(10)	r_{100}							r_{100}						
16	11	T(11)	DEL(11)	W(11)	AA(11)	BB(11)	r_{110}							r_{110}						
17	12	T(12)	DEL(12)	W(12)	AA(12)	BB(12)	r_{120}							r_{120}						

Figura 4. Schema del Simulatore di Ritardo DS implementato nel foglio di calcolo elettronico Microsoft Excel. Nella prima colonna (A) viene riportato il tempo j in giorni a partire dalla prima oviposizione della stagione, nella seconda (B) la temperatura media giornaliera $T(j)$, nella terza (C) il ritardo istantaneo $DEL_k(j)$. I parametri del modello DDM sono calcolati dai dati di queste tre colonne ed entrano nel primo ritardo variabile (TVD_1). Nella colonna G viene riportato il flusso giornaliero di nuovi nati e nella riga 5 sono riportati i dati della coorte iniziale in ingresso.

b) Ricerche di campo.

Il sito sperimentale di riferimento per le ricerche in campo della UR è il Lago di Fogliano, uno dei quattro Laghi Pontini. E' un lago di acqua salmastra parallelo alla costa tirrenica e separato dal mare da una sottile duna. Il lago fa parte del Parco Nazionale del Circeo ed è sede di una serie di attività di acquacoltura. Nel corso del 2003, l'UR ha collaborato con il Laboratorio Centrale di Idrobiologia (MIPAF) alla realizzazione di un laboratorio di ricerca presso il lago, in un edificio messo a disposizione dal Parco.

A partire da Marzo 2003 sono stati effettuati prelievi mensili di zooplancton in cinque diversi punti del lago, adottando la stessa procedura sperimentale seguita in una campagna di campionamenti svolta nel 1992-93 (e). In ciascun punto per ciascun campionamento sono stati filtrati 300 litri d'acqua tramite una trappola di Patalas da 15 litri con una maglia di 0.1 mm. I campioni sono stati fissati ed analizzati successivamente presso il Laboratorio Centrale di Idrobiologia (a Roma). L'analisi dei campioni è consistita nel riconoscimento e nel conteggio dei seguenti taxa:

Taxa	Phylum	Subphylum	Classe	Sottoclasse	Ordine
1	Arthropoda	Crustacea	Maxillopoda	Copepoda	Calanoida
2	“	“	“	“	“
3	“	“	“	“	Harpacticoida
4	“	“	“	“	Cyclopoida
5	“	“	“	Cirripedia	
6	“	“	“	Ostracoda	
7	Mollusca		Gastropoda		
8	“		Bivalvia	Lamellibranchia	
9	Anellida		Polychaeta		

Tabella 1. Elenco dei nove principali taxa (e della loro classificazione) rilevati nei campioni prelevati dal Lago di Fogliano nell'anno 2003.

Dall'analisi dei campioni è stato ricavato l'andamento mensile delle densità del popolamento zooplanctonico per ciascun taxa (in numero medio d'individui per litro, ind/l) del Lago di Fogliano nell'anno 2003. Allo scopo di dare una descrizione sintetica della stagionalità dello zooplancton del lago, le densità dei vari taxa sono state raggruppate in: a) Zooplancton totale: tutti gli individui zooplanctonici, indipendentemente dalla Classe e dallo stadio di appartenenza, b) Copepoda: larve ed adulti di Copepodi, indipendentemente dall'Ordine e dallo stadio di appartenenza, c) Altro: larve ed adulti zooplanctonici non appartenenti alla Sottoclasse dei Copepodi.

Gli andamenti mensili dei tre raggruppamenti sono riportati nella Figura 5.

La figura 5 mostra che nel corso del 2003 la densità zooplanctonica nel Lago di Fogliano ha seguito un andamento bimodale con due massimi ben pronunciati: uno all'inizio della primavera e l'altro verso la fine dell'estate. Essa mostra inoltre che il popolamento zooplanctonico del lago è costituito per la maggior parte da Copepodi.

Sulla base delle misure effettuate, risulta dunque confermato l'andamento stagionale dello zooplancton nel Lago di Fogliano, già ipotizzato in riferimento alla Figura 12 della Relazione del Primo Anno. Tuttavia, i risultati della misure effettuate dalla nostra UR definiscono la stagionalità zooplanctonica con un maggior dettaglio. Un tale dettaglio potrebbe essere sufficiente per mettere in evidenza l'eventuale impatto dell'aumento di temperatura e/o d'irradianza ultravioletta sulla fenologia e sulla demografia delle popolazioni zooplanctoniche.

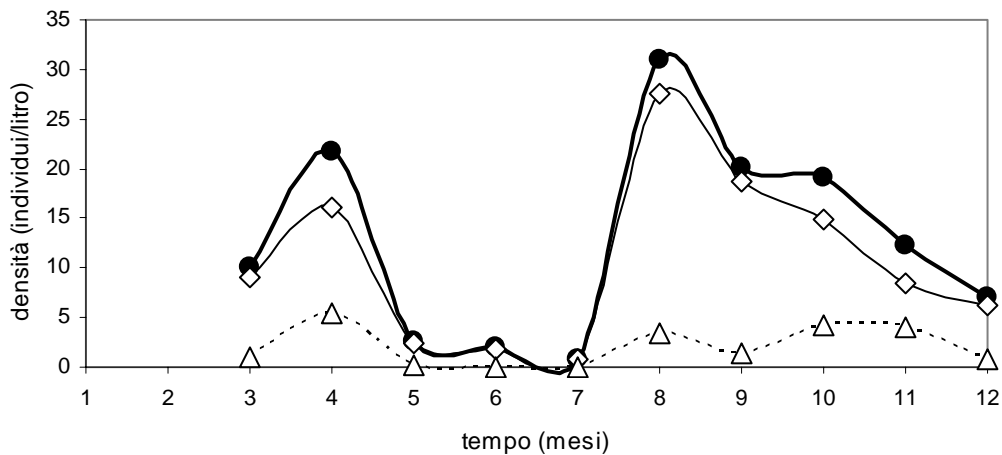


Figura 5. Andamento di diversi taxa zooplanctonici nel Lago di Fogliano nell'anno 2003. Densità di popolazione (ind/l) dello zooplankton totale (cerchi pieni), dei Copepodi (rombi vuoti) e delle restanti specie zooplanctoniche (triangoli vuoti).

c) Ricerche di laboratorio.

Come nel primo anno, le ricerche di laboratorio sono state orientate verso la sperimentazione di modelli analogici per simulare l'impatto dell'aumento della temperatura e dell'irradianza ultravioletta su popolazioni sperimentali vive. Nel secondo anno gli esperimenti sono stati effettuati prevalentemente su coorti di Anostraci della Specie *A. franciscana*. Lo scopo era di capire se il rallentamento della velocità di sviluppo provocato dalla radiazione UV-B sulle larve dell'Anfibio *X. laevis* (messo in evidenza negli esperimenti del Primo Anno) si verifica anche per le larve di *A. franciscana*. In caso affermativo, questo suggerirebbe che non soltanto un eventuale aumento della temperatura media, ma anche un aumento d'irradianza ultravioletta può alterare la stagionalità dello zooplankton negli ecosistemi lacustri con conseguente alterazione dei cicli ecologici. .

Sono stati eseguiti cinque esperimenti in cui coorti di 150 naupli (larve) di *A. franciscana* appena sgusciati sono state esposte ad una dose giornaliera di radiazione UVB via via decrescente. I risultati di questi esperimenti, hanno mostrato che, come ci si poteva aspettare, la mortalità dei naupli aumenta con la durata (e la dose) dell'esposizione (Figura 6). Le percentuali di mortalità si mantengono entro il 10% fino all'esposizione di 30 s ed il grafico sembra mettere in evidenza un punto di flesso intorno a $50 \text{ Jm}^{-2}\text{d}^{-1}$. Questo potrebbe significare che gli individui sono (mediamente) in grado di riparare i danni causati da esposizioni fino a una tale dose.

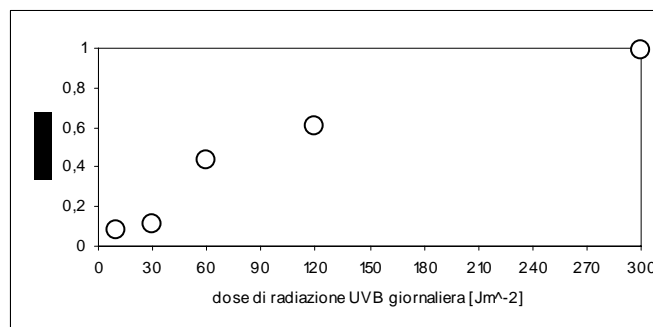


Figura 6. Percentuale d'individui di *A. franciscana* che non hanno raggiunto lo stadio di maturazione quando sono state esposte a dosi giornaliere differenti di radiazione di radiazione UVB (Irradianza: 1 W/m^2).

Il risultato ottenuto non può essere generalizzato perché la mortalità dei controlli corrispondenti è risultata, in media, non trascurabile (20%). Sono in corso ricerche per individuare condizioni sperimentali che permettano di contenere la mortalità dei controlli entro il 10%. A causa della non trascurabile mortalità dei controlli, lo stress sub-letale per *A. franciscana* è stato definito come quello che produce nelle coorti esposte una mortalità paragonabile a quella dei controlli corrispondenti. In base a tale definizione, le esposizioni a 10 e 30 $\text{Jm}^{-2}\text{d}^{-1}$ vengono classificate 'sub-letali', quelle a dosi maggiori 'letali'.

I risultati degli esperimenti mostrano che coorti di *A. franciscana* esposte a dosi sub-letali di radiazione UVB nel corso dello sviluppo larvale raggiungono la maturazione in ritardo rispetto ai controlli (come nel caso di *X. laevis*, confrontare Relazione del Primo Anno). Tuttavia, basandosi su pochi dati, essi debbono essere a loro volta confermati.

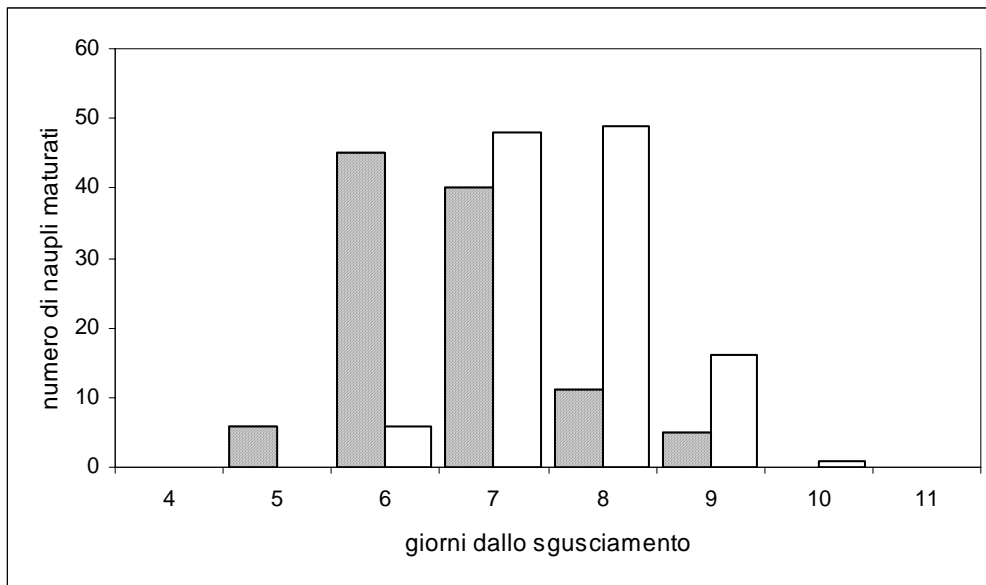


Figura 7. Confronto tra le frequenze di maturazione giornaliera della coorte esposta alla dose sub-letale di $10 \text{ Jm}^{-2}\text{d}^{-1}$ radiazione UVB (barre vuote) e quelle della coorte di controllo (barre piene).

Nel corso dell'anno 2003 si sono intensificati i tentativi di allevamento in laboratorio di una nuova Specie acquatica, autoctona del Lago di Fogliano, da affiancare a *X. laevis* e ad *A. franciscana* quale terzo modello analogico negli esperimenti della UR. Dopo vari tentativi andati a vuoto, siamo riusciti ad allevare in condizioni controllate in laboratorio individui adulti del Crostaceo *Palemon serratus*. Per questo è stato realizzato 'ad hoc' un nuovo laboratorio presso l'Istituto Centrale di Idrobiologia del MIPAF.

d) Climatologia del Lago di Fogliano.

Nel corso dell'anno 2003 sono proseguite le misure per il monitoraggio continuo dei principali parametri microclimatici del Lago di Fogliano. Su base giornaliera, sono stati misurati i principali parametri dell'aria (temperatura, umidità relativa, radiazione globale, PAR, intensità e direzione del vento, precipitazione) e dell'acqua (temperatura, salinità, PH, ossigeno). Inoltre, sono stati misurati giornalmente l'ozono totale e l'irradianza UVB al suolo sulla città di Roma. Questi dati possono essere considerati (in prima approssimazione) rappresentativi dell'area di Fogliano.

Le misure effettuate negli anni 2002 e 2003 e quelle in corso nel 2004, sono alla base della descrizione della climatologia del Lago di Fogliano e dell'applicazione del modello 'Delay Simulator' alla simulazione della dinamica delle popolazioni zooplanctoniche dello stesso lago.

Per motivi di spazio, non si riportano gli andamenti giornalieri di tutti i parametri misurati, ma soltanto quelli di ozono totale e d'irradianza ultravioletta.

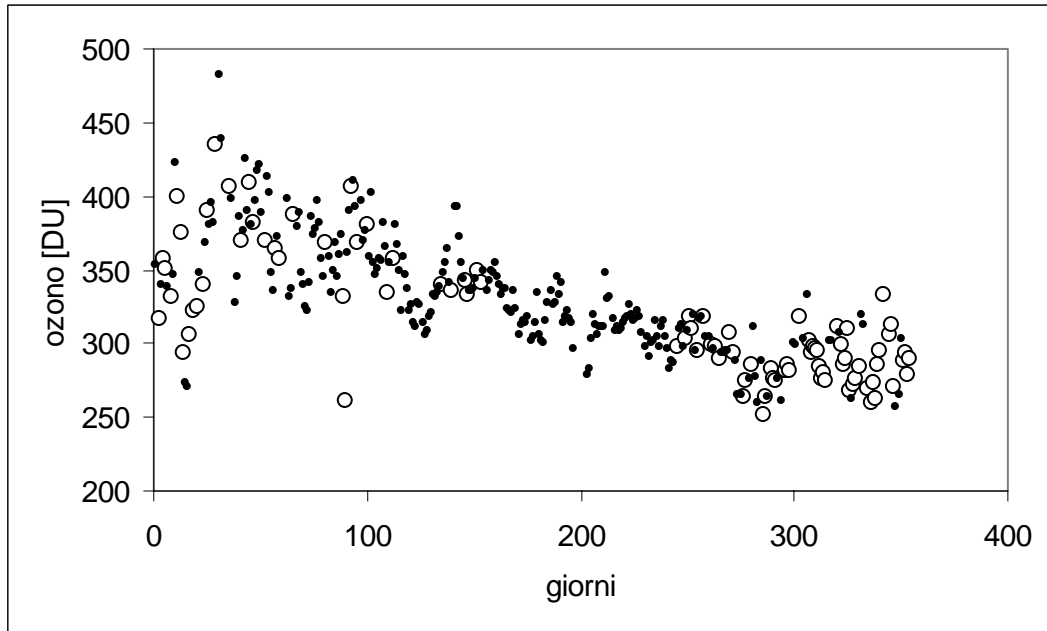


Figura 8. Andamento dell'ozono totale su Roma misurato presso la Stazione di Radiometria Solare nell'anno 2003 (Dr.ssa A.Siani, Dip. Fisica, Università La Sapienza). I cerchi vuoti ed i punti indicano rispettivamente misure con deviazione standard minore o maggiore di 2,5 DU (Dobson Units).

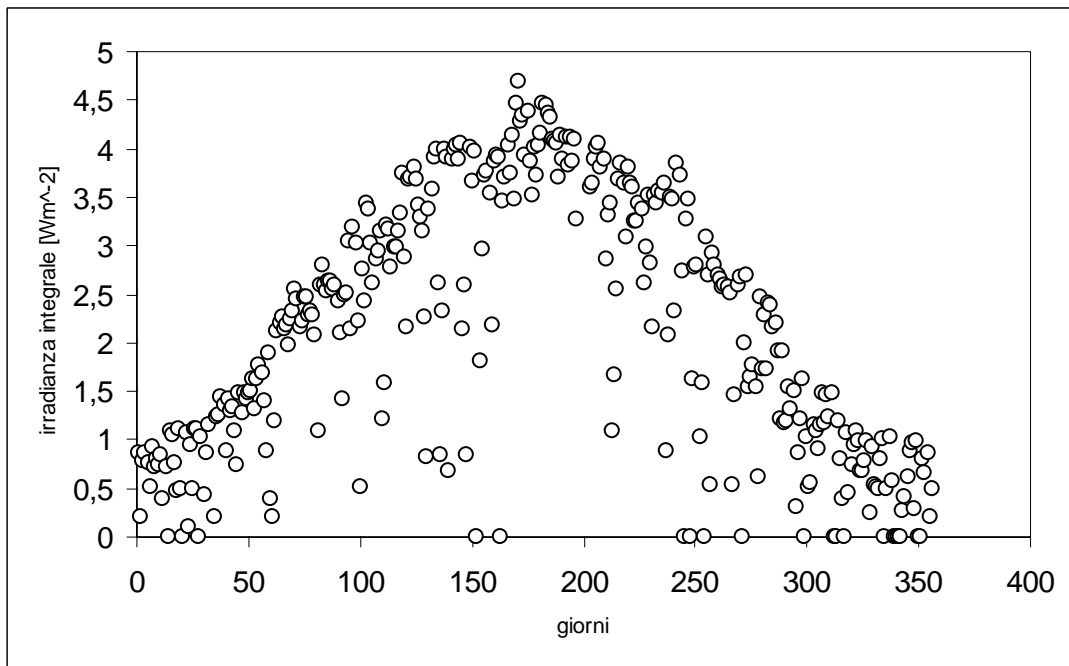


Figura 9. Andamento dell'irradianza ultravioletta (tra 290 e 325 nm) a mezzogiorno locale (tra le 11:30 e le 12:30) misurata nell'anno 2003 presso la Stazione di Radiometria Solare del Dipartimento di Fisica dell'Università di Roma La Sapienza (Dr.ssa A. Siani).

e) Ricerca di documentazione 'storica' sul Lago di Fogliano.

Le ricerche di documentazione relative a studi e ricerche svolte in passato nel Lago di Fogliano ha portato al ritrovamento dei risultati di una campagna di campionamenti di zooplancton effettuata nel 1992-93 (Giorgi U. et al., 1996). I dati dei campionamenti, effettuati in quattro punti del lago con cadenza mensile dall' Aprile 1992 all'Aprile 1993, si riferiscono ai tre Ordini dei Copepodi (Calanoidi, Arpacticoidi e Ciclopoidi) ed in particolare alle Specie: *Acartia clausi*, *Acartia margalefi* (Calanoidi), *Oithona nana*, *Oithona similis* (Ciclopoidi), nonché ad altri taxa di Crostacei: Policheti, Cirripedi e Bivalvi. Nella campagna condotta nel 2003 dalla nostra UR (b) è stata attuata la stessa procedura sperimentale di quella del 1992-93 in modo da poter confrontare i risultati, evidenziare eventuali differenze significative e metterle in relazione ad eventuali aumenti di temperatura o d'irradianza ultravioletta. Questi confronti sono attualmente in corso e richiederanno per essere completati almeno un altro anno, sia perché la campagna di misure della nostra UR presso il Lago di Fogliano è ancora in corso e terminerà nel Dicembre 2004, sia perché sarà necessario cercare, trovare ed elaborare i dati di temperatura e d'irradianza ultravioletta degli ultimi dieci anni riferibili al lago. Tuttavia, i primi confronti sembrano mettere in evidenza una diminuzione significativa della densità di zooplancton totale ed un anticipo della sua stagionalità (Figura 10).

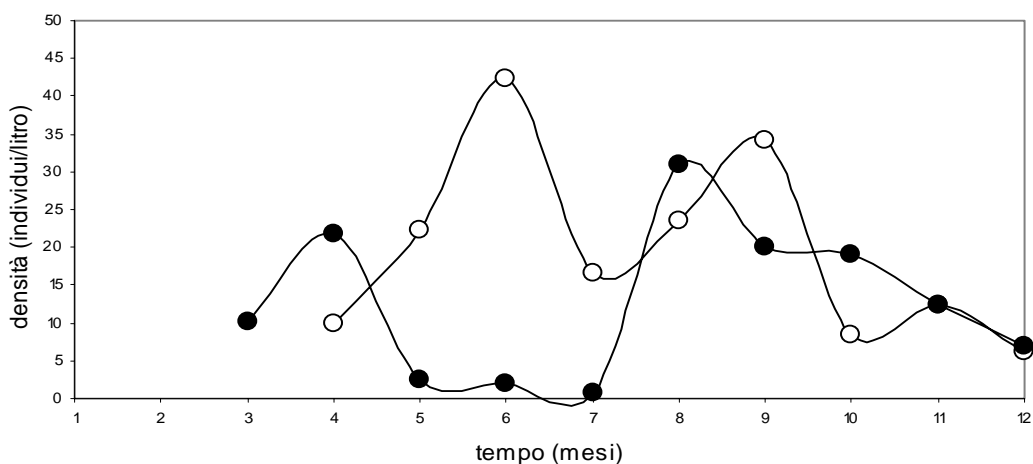


Figura 10. Andamenti mensili della densità di organismi zooplanctonici (individui/litro) rilevati nel Lago di Fogliano nella campagna di misure del 1992-93 (cerchi vuoti) ed in quella del 2003 (cerchi pieni). I dati di Agosto 1992, mancanti dalla serie pubblicata, sono stati interpolati. I dati recenti evidenziano una minore densità di zooplancton ed un anticipo di almeno un mese rispetto a quelli di dieci anni fa.

Non si hanno informazioni circa la variabilità di anno in anno della densità zooplanctonica del Lago di Fogliano e quindi non è possibile attualmente valutare la significatività dell'anticipo evidenziato dalla Figura 10. Per questo è in corso la ripetizione della campagna di campionamenti descritta al punto (b) e la ricerca di ulteriori dati 'storici' sul lago. Qualora, al termine di tali ricerche, il ritardo evidenziato risultasse significativo, esso potrebbe essere messo in relazione con l'aumento della temperatura globale.

In parallelo alla ricerca di dati storici sull'ecologia del lago, sono proseguite le ricerche dei dati sull'idrologia (batimetria, correnti, temperatura, salinità, ossigeno, ecc.) e sulla climatologia (temperatura, umidità, radiazione, precipitazioni, vento, ecc.) dello stesso. Alcune serie interessanti sono state rinvenute e l'analisi della loro affidabilità è attualmente in corso.