



**Università degli Studi  
della Basilicata**



**Università degli Studi  
della Calabria**



**Politecnico  
Di Bari**

# **Università degli Studi della Calabria**

## **Dottorato di Ricerca in Ingegneria Idraulica per l'Ambiente e il Territorio**

**XXII Ciclo**

**Tesi di Dottorato di Ricerca**

### **CONTRIBUTO ALLA RIOSSIGENAZIONE NATURALE DELLA ZONA EUFOTICA DEI CORPI IDRICI DOVUTO ALL'ATTIVITA' FOTOSINTETICA**

*Sett. Ric. : ICAR/02*

*Tutor:*

Ch.mo Prof. G.C. Frezza

*Co-Tutor:*

Ing. E. Infusino

*Coordinatore del corso di Dottorato:*

Ch.mo Prof. F. Macchione

*Candidato:*

Ing. Gennaro Nigro



..... "Laudato si', mi' Signore, per sor Aqua,  
la quale è molto utile et humile et pretiosa et casta." .....

*San Francesco D'Assisi*

( secdo XII)

# Indice

## Indice

### **CAPITOLO 1. INTRODUZIONE.....6**

<b>1.1</b>	<b>Gli ecosistemi fluviali .....</b>	<b>8</b>
<b>1.2</b>	<b>Le comunità autotrofe degli ecosistemi fluviali .....</b>	<b>13</b>
<b>1.3</b>	<b>La fotosintesi .....</b>	<b>20</b>
<b>1.4</b>	<b>Modellazione della qualità .....</b>	<b>24</b>

### **CAPITOLO 2. BREVE STATO DELL'ARTE.....28**

<b>2.1</b>	<b>La fotosintesi come produzione primaria.....</b>	<b>29</b>
<b>2.2</b>	<b>Metodi di misura della produzione di ossigeno per via fotosintetica.....</b>	<b>35</b>
	2.2.1 Metodi di impostazione teorica .....	36
	2.2.2 Metodi di impostazione sperimentali .....	38
	Introduzione.....	38
	Curve luce-fotosintesi - variabili principali.....	39
	Modelli in letteratura .....	43

<b>CAPITOLO 3. MATERIALI E METODI .....</b>	<b>51</b>
3.1 Inquadramento geografico dei siti di ricerca .....	52
3.2 Sperimentazione .....	56
3.3 Campagne di campionamento e prove .....	57
3.4 Costruzione di un prototipo di strumento all'uso della sperimentazione.....	58
3.5 Costruzione di una camera di termostatazione .....	59
3.6 PARTE 1° - sperimentazione fiume Busento - alghe filamentose .....	61
3.7 PARTE 2° - sperimentazione f. Crati sbarramento di Tarsia – fitoplancton .	69
3.8 PARTE 3° - sperimentazione alghe coltivate – fitoplancton .....	70
3.9 Indagini di laboratorio .....	71
3.10 Esperimenti luce-fotosintesi (curve P/I) .....	73
<b>CAPITOLO 4. ANALISI DEI DATI.....</b>	<b>74</b>
4.1 PARTE 3° - sperimentazione alghe coltivate – fitoplancton .....	75
4.2 PARTE 2° - sperimentazione f. Crati sbarramento di Tarsia – fitoplancton .	81
4.3 Indagini di laboratorio .....	83
4.4 Esperimenti luce-fotosintesi (curve P/I) .....	84
4.5 PARTE 1° - sperimentazione fiume Busento - alghe filamentose .....	157
<b>CAPITOLO 5. CONCLUSIONI.....</b>	<b>159</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>162</b>
<b>ALLEGATI.....</b>	<b>168</b>

## **CAPITOLO 1. INTRODUZIONE**

### **Indice capitolo**

- 1.0      Introduzione**
- 1.1      Gli ecosistemi fluviali**
- 1.2      Le comunità autotrofe degli ecosistemi fluviali**
- 1.3      La fotosintesi**
- 1.4      Modellazione della qualità**

## INTRODUZIONE

Nella pianificazione e gestione delle risorse idriche di un bacino idrografico, oggi ormai è ampiamente diffuso l'uso della modellazione quali-quantitativa.

La modellazione, consente di simulare il comportamento dei processi fisici, chimici e biochimici che si sviluppano nel sistema fluviale, interpretando tra gli altri il fenomeno dell'autodepurazione naturale dei corpi idrici.

Nel contesto della modellazione della qualità delle acque, un ruolo molto spesso trascurato è quello che svolge la componente autotrofa presente nella zona eufotica dei corpi idrici.

Gli ecosistemi fluviali sono sistemi *non equilibrium* in cui la componente vegetale è soggetta a drastici fattori limitanti determinati dal dinamismo fluviale.

Le comunità autotrofe degli ambienti delle acque correnti o lotiche sono costituite da fitoplancton, periphyton e macrofite, esse attraverso la fotosintesi contribuiscono alla riossigenazione dei corpi idrici utilizzando la radiazione solare (PAR).

Nella reazione fotosintetica esiste un rapporto stechiometrico tra carbonio organico assorbito e ossigeno prodotto ( $C/O$ ) e tra carbonio organico assorbito e clorofilla ( $C/clorofilla$ ), questo rapporto permette di mettere in relazione la produzione primaria con la produzione di ossigeno, infatti, la produzione di ossigeno è stata utilizzata per la misura delle produzioni primarie degli organismi eterotrofi di un sistema ecologico, una comunità o una parte di essa. Con riferimento ad un determinato lasso di tempo è possibile valutare la produzione di ossigeno lorda, la produzione netta di ossigeno e la respirazione.

In letteratura si trovano vari metodi di misura di produzione dell'ossigeno fotosintetico, alcuni di impostazione teorica, quale il metodo della bottiglia chiara e della bottiglia scura, della curva diurna, di O'Connor and Di Toro, ecc., ed alcuni di impostazione sperimentale.

I metodi sperimentali, (Blackmann, Baly, Smith, Steel, Webb, Platt, ecc.), proposti da diversi autori, sono generalmente proporzionali alla radiazione solare, e

vengono detti curve luce-fotosintesi (P/I), in cui P è la produzione di ossigeno e I la radiazione solare.

E' stata approntata una campagna di sperimentazione per la determinazione della produzione di ossigeno fotosintetico a diverse condizioni.

La sperimentazione si svolge su tre direttrici e su diverse aree di studio.

La prima sul Busento, la seconda sul fiume Crati (sbarramento di Tarsia) e la terza su alghe coltivate. Per le misure di produzione di ossigeno degli autotrofi (*alghe filamentose* e *fitoplancton*), si è costruito un prototipo di strumento che permette la misura dell'ossigeno prodotto nonché della respirazione notturna.

Le prove sono state eseguite all'aperto ad azimut costante e senza ostacoli. Con i dati degli esperimenti sono state costruite le curve di produzione dell'ossigeno disciolto in funzione della radiazione solare, curve luce/fotosintesi (P/I).

Le curve luce/fotosintesi costruite, permettono il calcolo di alcuni parametri caratteristici della fotosintesi, e permettono di interpretare l'efficienza fotosintetica (ossia l'assimilazione per unità massa per unità di radiazione nell'unità di tempo), l'intensità luminosa ottimale e quella saturante. Si è confrontata la produzione delle varie formule in letteratura con i dati sperimentali.

## 1.1 Gli ecosistemi fluviali

L'ecosistema è l'insieme di organismi e materiali che danno vita ad una comunità stabile ma in continua evoluzione dinamica.

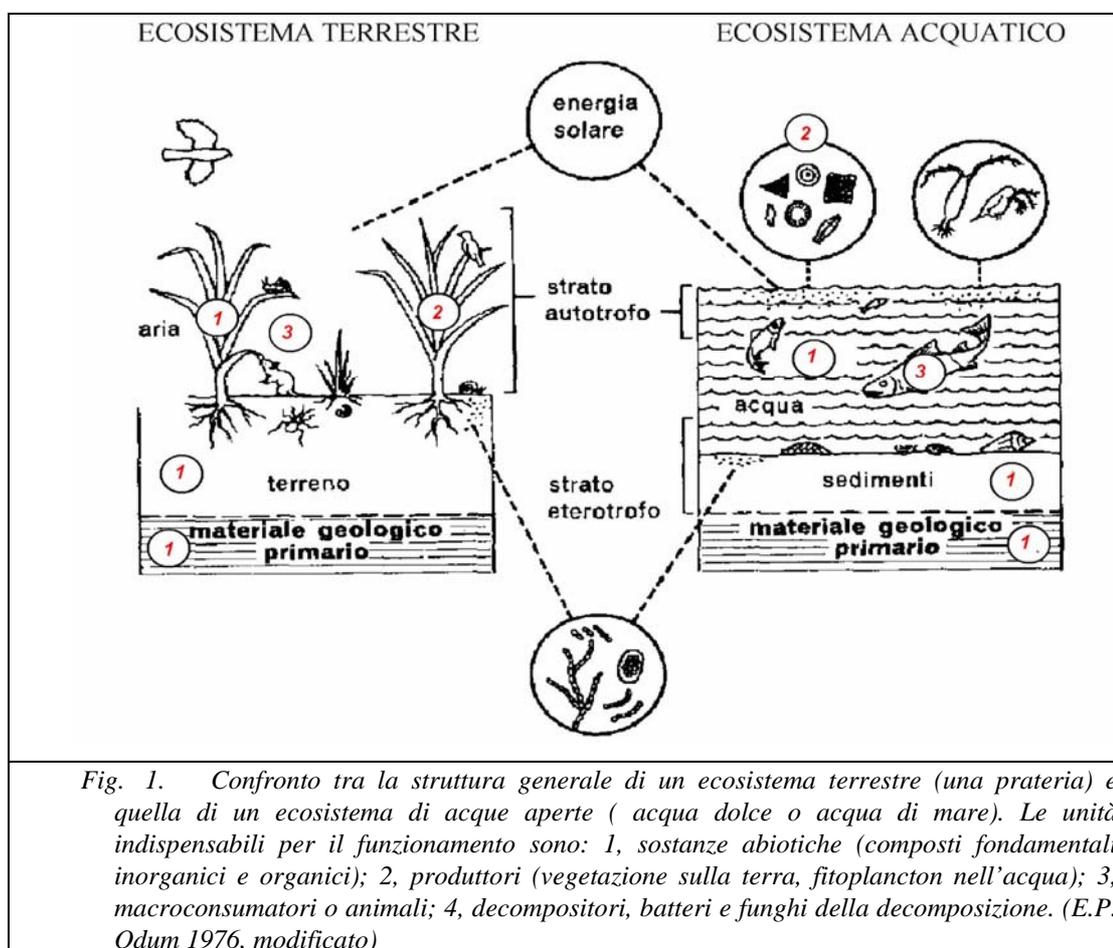
Da un punto di vista strutturale nell'ecosistema si possono individuare quattro elementi principali, così come indicato nella figura 1. osservando la figura 1 si possono osservare:

(1) *sostanze abiotiche*, elementi e composti fondamentali inorganici e organici dell'ambiente;

(2) *produttori*, organismi autotrofi, principalmente le piante verdi;

(3) *consumatori di grossa taglia o macroconsumatori*, organismi eterotrofi, principalmente animali, che si nutrono di altri organismi e di materiale organico articolato;

(4) *decompositori o microconsumatori* (chiamati anche saprobi o saprofiti), organismi eterotrofi, soprattutto batteri e funghi che demoliscono i complicati composti del protoplasma morto, assorbono parte dei composti di decomposizione e liberano sostanze semplici che possono essere utilizzate dai produttori (E.P.Odum,1966).



L'ecosistema di acqua dolce, quindi è un complesso habitat, con numerose interazioni e processi ambientali tra componenti biotiche e abiotiche.

In fig. 2 vengono presentati le principali componenti di un ecosistema acquatico di acqua dolce.

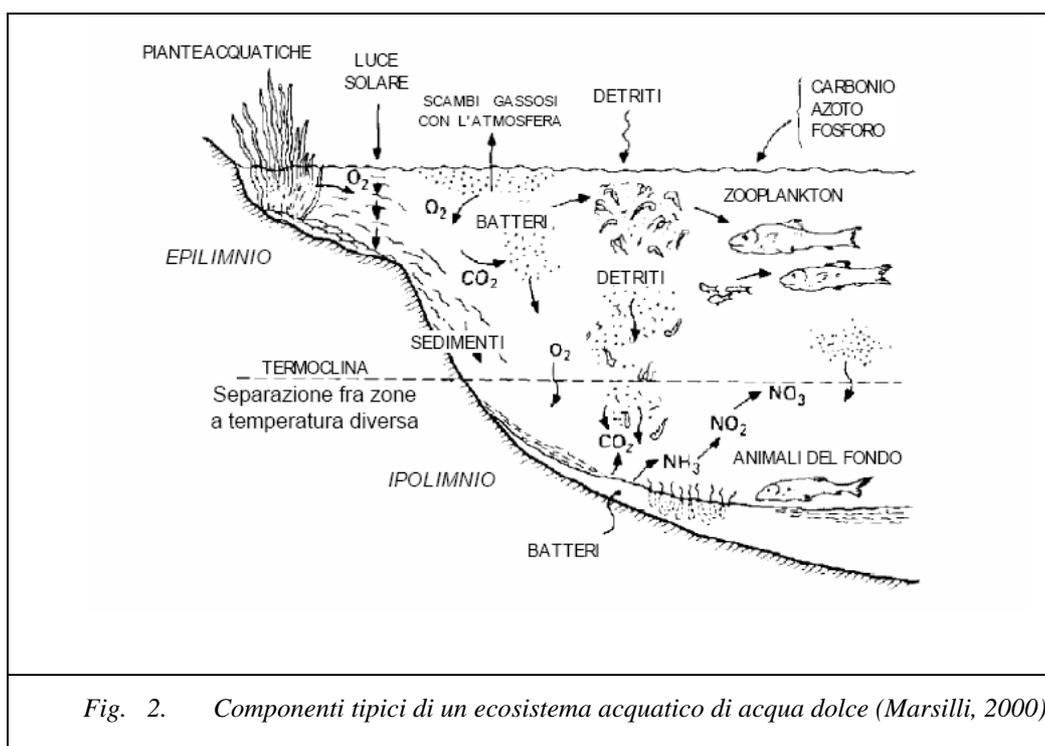


Fig. 2. Componenti tipici di un ecosistema acquatico di acqua dolce (Marsilli, 2000)

Gli ecosistemi acquatici, di acque dolci, si distinguono in ecosistemi acquatici lentic, caratterizzati da acque ferme o a bassa velocità di corrente (laghi, stagni, zone umide) ed ecosistemi acquatici lotici caratterizzati da acque correnti (ecosistemi fluviali).

Gli aspetti fondamentali che differenziano queste due strutture ambientali sono: la profondità, generalmente, le acque correnti hanno profondità assai minori che non le acque ferme; la corrente, il moto dell'acqua è sempre molto più cospicuo dei movimenti che per varie ragioni possono temporaneamente determinarsi in una massa d'acqua stagnante. A differenza dell'ambiente lentico, che forma un ecosistema praticamente chiuso, quello lotico deve interpretarsi come un sistema aperto, strettamente correlato a quello terrestre.

**Gli ecosistemi fluviali** (ecosistemi acquatici lentic) sono caratterizzati da forti correnti, che determinano rimescolamento delle acque adiacenti con facilitazione della trasmissione di ossigeno e nutrienti tra i diversi strati di profondità.

Tali ambienti sono, quindi, sistemi non equilibrio in cui la componente vegetale è soggetta a drastici fattori limitanti determinati dal dinamismo fluviale (I.F.F., 2003).

Le caratteristiche mesologiche degli ecosistemi fluviali, come temperatura, velocità della corrente, litologia e granulometria del substrato, trasparenza dell'acqua, disponibilità di nutrienti, ecc., sono fattori che determinano la distribuzione lungo il corso d'acqua dei vegetali; la biodiversità varia sia in senso longitudinale (dalla sorgente alla foce) sia in senso trasversale (dal centro dell'alveo bagnato sino al limite dell'alveo di piena). Queste distribuzioni sono variabili anche nell'arco dell'anno in funzione del regime idrologico della stagione e dei contributi delle falde. Nei periodi estivi, quando in genere la portata dei corsi d'acqua è ridotta e così anche le turbolenze, mentre la temperatura è sensibilmente maggiore, la massa degli organismi autotrofi e degli eterotrofi in genere è massima.

Nelle componenti di un ecosistema fluviale sono comprese sia le sostanze immesse nell'ambiente dall'esterno sia le componenti biotiche del sistema.

Al naturale dinamismo fluviale si aggiungono azioni antropiche, quali modifiche della morfologia dell'alveo e delle sponde (realizzazione di briglie, di difese spondali, di pile di ponti, ecc., che intervengono sul naturale deflusso); sversamenti di inquinanti, di tipo non persistente soprattutto di natura organica (provenienti da fonti di tipo puntuale o diffuso); sversamenti con apporto di calore (derivante da impianti industriali), ecc..

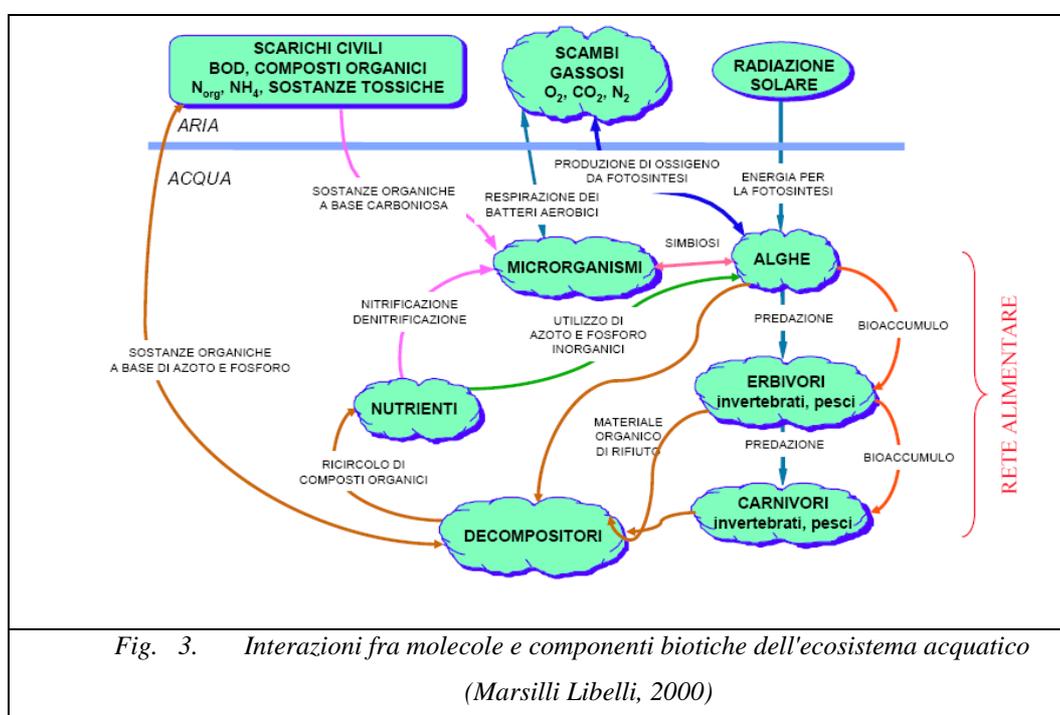
Queste modifiche apportano significative influenze sui meccanismi naturali attraverso i quali le sostanze biodegradabili sono trasformate ed utilizzate dall'ecosistema fluviale, influenzando la concentrazione di ossigeno disciolto presente nel corpo idrico (AA.VV.,1983), (Frega , Infusino, Macchione, 1995).

Dall'ambiente esterno provengono non solamente le molecole di sostanze inquinanti, ma anche delle fondamentali sostanze necessarie per lo sviluppo dell'ecosistema, quali ossigeno, nutrienti ed energia sotto forma di radiazione solare.

Attraverso l'energia fornita dal Sole al sistema acquatico, si sviluppa la rete alimentare che esercita anche una fondamentale funzione sui vari processi di biodegradazione di molti materiali organici, sia a base carboniosa che azotata.

Contemporaneamente, batteri specializzati provvedono all'ammonificazione dell'azoto organico, ossidazione dell'ammoniaca, decomposizione dei prodotti organici di rifiuto e riciclaggio dei nutrienti (azoto e fosforo).

I processi e le interazioni fra le molecole presenti dell'ambiente acquatico e le componenti biotiche sono schematicamente illustrati in figura 3.



## 1.2 Le comunità autotrofe degli ecosistemi fluviali

Le comunità autotrofe degli ambienti delle acque correnti o lotiche sono costituite da fitoplancton, periphyton e macrofite.

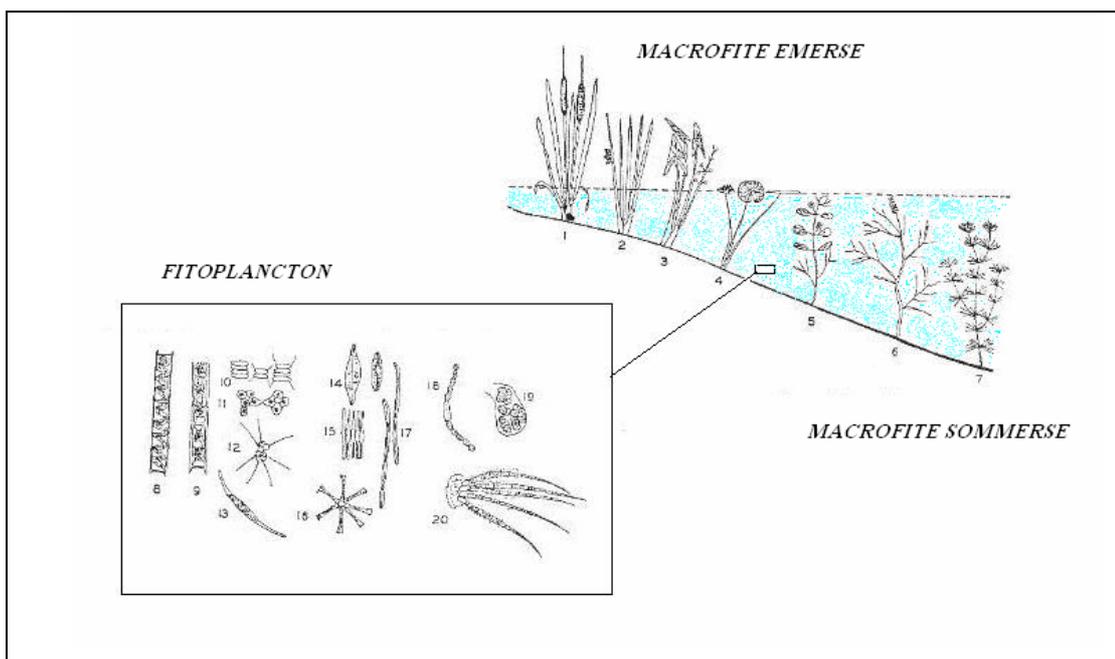


Fig. 4. Autotrofi acquatici (Odum, 1966, modificato)

Nel disegno sono rappresentate : (1) coda di gatto (*Typha*); (2) giunco d'acqua (*Scirpus*); (3) *Sagittaria*; (4) giglio d'acqua (*Nynphaea*); (5) e (6) due specie di piante acquatiche (*Potamogeton diversifolia*, *P. pectinatus*); (7) *Chara*; (8) *Spirogyra*; (9) *Zygnema*; (10) *Scenedesmus*; (11) *Coelastrum*; (12) *Richteriella*; (13) *Closterium* (un desmide); (14) *Navicula*; (15) *Fragilaria*; (16) *Asterionella* (che galleggia nell'acqua come un piccolo paracadute); (17) *Nitzschia*; (18) *Anabaena*; (19) *Microcystis*; (20) *Gloeotrichia*.

(8) e (9) : alghe filamentose

(10) - (20) : fitoplancton

[(10) - (13) : alghe verdi]

[(14) - (17) : diatomee]

[(18) - (20) : alghe azzurre ]

[(19) e (20) : rappresentano parti di colonie racchiuse in una matrice gelatinosa]

**Fitoplancton:** organismi che galleggiano nella massa d'acqua a varie profondità e che sono passivamente trasportati dalle correnti e dal moto ondoso (caratteristico del potamon) e al più possono spostarsi verticalmente; essi, in base alle dimensioni, sono classificabili in microplancton (da 60 a 500  $\mu\text{m}$ ), nanoplancton (da 5 a 60  $\mu\text{m}$ ) e ultraplancton ( $< 5 \mu\text{m}$ ). (Infusino, 2009). La grande maggioranza dei fitoplanctonti appartiene alle *Cianoficee*, alle *Cloroficee* (ivi comprese le Coniugate), alle *Crisoficee*, ai *Dinoflagellati* ed alle *Diatomee*. Gli organismi fitoplanctonici hanno forma spesso allungata e frequentemente sono uniti a formare colonie a catena. Il loro peso specifico non si discosta molto dall'unità, ed inoltre spine ed ornamentazioni aumentano spesso la superficie portante. Tutti questi caratteri contribuiscono a favorire il galleggiamento, la locomozione essendo scarsa o nulla. (Tonolli 1964).

#### *Cianoficee, o Mixoficee o Schizoficee.*

Vengono anche comunemente denominate alghe verdi-azzurre, in quanto generalmente i loro pigmenti hanno questo colore, molto ben distinguibile dal verde-giallo delle altre alghe. Per di più, si deve oggi ritenere che le Cianoficee siano più affini ai batteri che non alle alghe vere e proprie, e di questo fa fede, fra l'altro, la frequente eterotrofia delle specie appartenenti a questo phylum, come anche la capacità azoto-fissatrice di alcune di esse. I pigmenti non sono contenuti in plastidi, ma sono diffusi nei liquidi cellulari.

#### *Cloroficee.*

Hanno un corredo pigmentario del tutto simile a quello delle piante superiori e sono capaci di elaborare le stesse sostanze. Comprendono organismi unicellulari, come *Chlorella*, *Chlamidomonas*, ecc.; forme coloniali, come *Eudorina*, *Pandorina*, *Volvox*, *Pediastrum*, *Gonium*, ecc.; ed infine alghe con caratteristiche tipiche - le Coniugate - che si trovano soltanto nelle acque dolci. Appartengono a queste ultime specie unicellulari (*Desmidiacee*), che hanno una tipica strozzatura (istmo) a metà della

cellula, per cui ne risultano forme a spiccata simmetria bilaterale, come *Closterium*, *Cosmarium*, *Staurastrum*, *Micrasterias*, ecc., e specie pluricellulari, filamentose, non ramificate (*Zignemali*), come *Spirogyra*, *Mougeotia*, ecc.

#### Crisoficee.

Hanno una tipica colorazione bruna-dorata, che dipende da una predominanza sugli altri pigmenti di caroteni e di xantofille. Sono provviste di flagelli e si ritrovano preferibilmente in acque correnti fredde, in sorgenti, ed anche nei laghi durante la primavera e l'autunno. I generi planctonici più comuni sono *Mallomonas*, *Dinobryon*, *Sinura*, *Uroglena*, *Tribonema*, ecc.

#### Dinoflagellati o Dinoficee.

Sono alghe per lo più unicellulari e che hanno una corazza, più o meno spessa ed ornata, di natura cellulosica, che presenta sempre un solco spirale o trasversale, dove trova posto uno dei due flagelli. Sono più frequenti in piccoli ambienti di pozza che in grandi laghi. I generi più comuni in acqua dolce sono *Peridinium*, *Ceratium*, *Gymnodinium*, *Glenodinium*, ecc.

#### Diatomee o Bacillarioficee.

La caratteristica fondamentale di queste alghe è rappresentata dal fatto che il corpo cellulare è racchiuso tra due teche silicee, o frustuli, che si impegnano una sull'altra, come una scatola con il suo coperchio. Questa caratteristica fa sì che le loro esigenze nutritive comprendano anche la silice ( $\text{SiO}_2$ ) in forma solubile. In certi ambienti, la scarsità di silice può essere addirittura determinante nel precludere l'insediamento di diatomee o nel regolarne le dimensioni del popolamento durante il ciclo stagionale. Anche per queste alghe abbiamo organismi unicellulari, come *Synedra*, *Achnanthes*, *Cymbella*, *Cyclotella*, ecc. e forme coloniali, come, *Fragilaria*, *Asterionella*, *Tabellaria*, *Melosira*, ecc. (Tonolli 1964)

**Periphyton:** organismi che vivono aderendo a piante sommerse o a rilievi e scabrosità ricoprendoli in tutto o in parte (alghe e fanerogame). L'insediamento e lo sviluppo di una comunità perifitica fluviale sono influenzati, oltre che da fattori ambientali fisici quale luminosità, temperatura, velocità della corrente, natura del substrato, anche e soprattutto dalle caratteristiche chimiche e chimico-fisiche delle acque. Le biocenosi perifitiche viventi in ambienti oligosaprobi sono composte principalmente da organismi clorofilliani (detti anche fitobentos), (Tonolli 1964).

**Macrofite:** piante acquatiche vascolari che crescono in acque poco profonde (fanerogame) e costituiscono una componente ubiquitaria, di notevole importanza in tutte le condizioni in cui si verifica una riduzione sostanziale della velocità della corrente (ambienti laterali, lanche, zone di sponda protetta).

**Le Alghe:** identificano organismi vegetali viventi in acque dolci e marine e rappresentano la componente principale degli eterotrofi nei corpi idrici con le loro specie microscopiche (monocellulari e coloniali) e del benthos con le specie tallose macroscopiche (pluricellulari). Le alghe si differenziano dagli altri gruppi vegetali per alcune fondamentali caratteristiche: dai Cianobatteri, in quanto le alghe sono organismi eucariotici, dai funghi, in quanto posseggono plastidi, dalle Briofite (Muschi), poiché presentano sporocisti, e dalle altre piante superiori (Pteridofite e Spermatofite), poiché non differenziano veri tessuti; esse presentano diversi tipi di organizzazione del corpo:

- Flagellata o monadoide, che comprende le forme unicellulari solitarie e riunite in colonie;
- Rizipodiale, in cui le cellule sono prive di pareti e possono emettere pseudopodi;

- Capsale o tetrasporale, in cui le cellule sono racchiuse in una gelatina comune assumendo forme diverse (stadi a palmella o gleocisti);
- Coccale, propria di cellule dotate di parete rigida e prive di flagelli;
- Sifonale, in cui la cellula è plurinucleata;
- Tricale, in cui il tallo è composto da più cellule complete in contatto tra di loro, con una crescita definita apicale o intercalare a seconda che la divisione avvenga all'apice del tricoma oppure sulla sua lunghezza;
- Sifonocladale, in cui i talli sono pluricellulari e plurinucleati;
- Pseudoparenchimatica, presente in organismi a talli laminari.

Le alghe sono caratterizzate da valenza ecologica molto ampia, potendo colonizzare ambienti apparentemente impossibili alla vita, come per esempio ghiacciai e acque termali; esse in virtù della plasticità con cui possono assorbire le radiazioni luminose, sono gli organismi autotrofi che possono colonizzare le maggiori profondità, rappresentando il primo gradino nella catena trofica del benthos.

Analogamente le alghe planctoniche sono i principali produttori di ossigeno e di biomassa nelle acque dolci e marine e quindi anello insostituibile della catena trofica. In determinate condizioni, l'eccessiva proliferazione di alcune specie fitoplanctoniche può determinare l'insorgenza dei fenomeni detti di fioritura che tendono ad abbassare il livello di ossigeno nelle acque, causando spesso danni ingenti agli altri esseri viventi.

Nei fiumi le alghe presenti in genere appartengono a numerose specie, ma si osservano dei gruppi dominanti, che possono avere degli sviluppi spettacolari seguiti da un repentino declino. In genere la successione delle specie osserva un ordine che si ripete nel tempo se non intervengono fattori esterni.

Tutto ciò indica che questi organismi sono sottoposti a dei fattori limitanti che ne influenzano la produttività: dalla concentrazione di alcune sostanze biogene come fosforo, azoto, potassio, calcio, magnesio, ecc e dalla presenza di fitoormoni (Infusino,2009).

In particolare, per una sintesi ottimale della clorofilla di popolazioni di alghe miste, il rapporto P/N varia tra 1/16 e 1/7 (secondo altri autori tra 1/10 e 1/5).

Un rapporto di N:P superiore a 16 è indice del fatto che il fosforo è l'elemento limitante della crescita algale, mentre per un rapporto inferiore a 7 l'azoto è l'elemento limitante (Frega & Infusino, 1992).

Le piante acquatiche (Fanerogame) hanno in genere foglie frastagliate e radici scarsamente sviluppate, in quanto è l'acqua, e non il terreno, la sorgente di nutrimento (Fallico et alii, 1992).

Possono avere radici respiratorie dette pneumatofori (i pneumatofori si dipartono dalle radici orizzontali immerse nel fango e si innalzano verticalmente fuoruscendo dall'acqua; sulla superficie esposta all'aria si formano delle fessure che permettono all'apparato radicale gli scambi gassosi), assenza di radici ancorate al fondo oppure radici che sollevano i fusti fuori dall'acqua (mangrovie); l'impollinazione e la disseminazione sono idrocore.

Esclusivamente acquatiche sono alcune piante dei generi

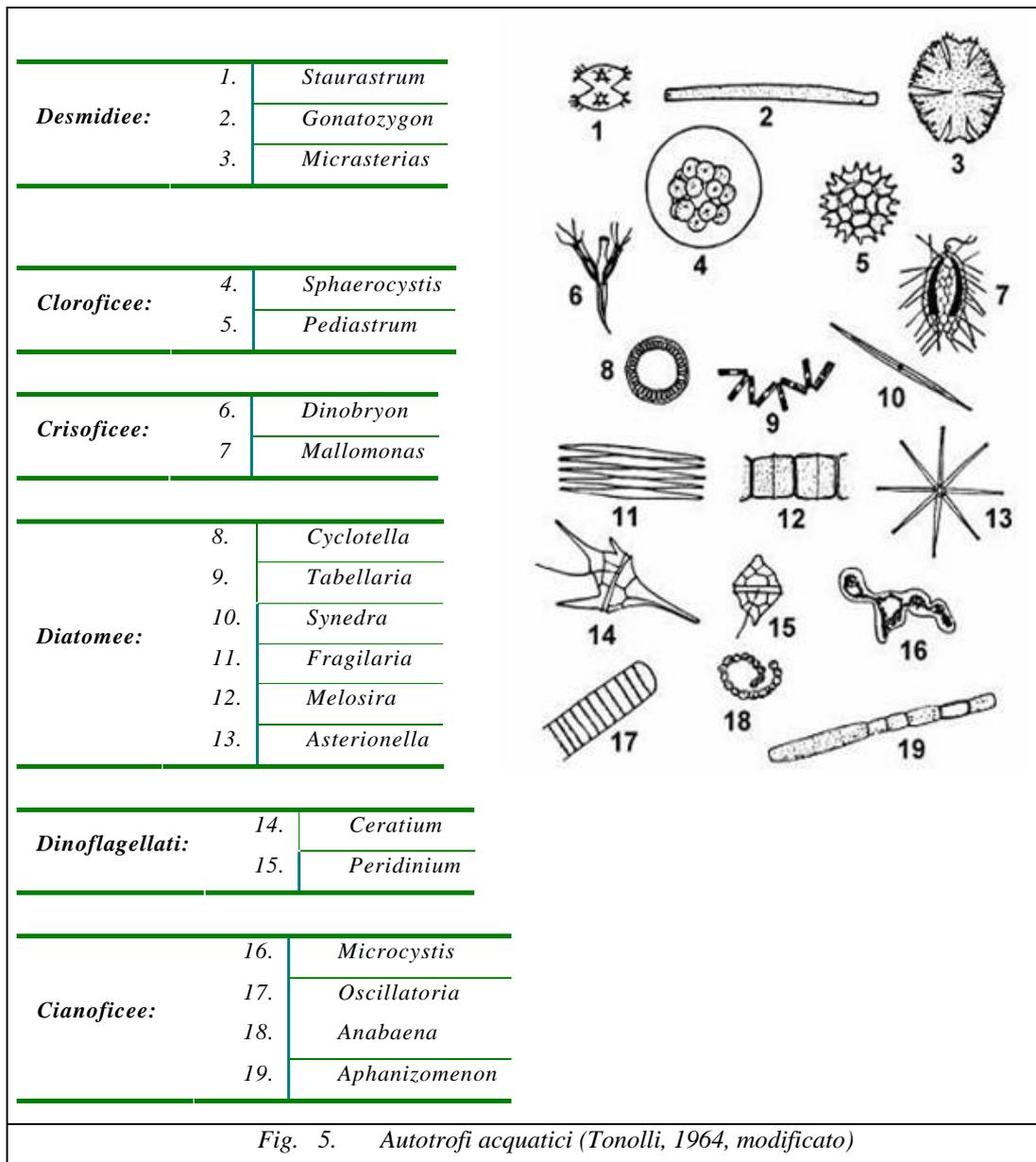
*Nymphaea*,

*Nelumbo*,

*Posidonia*,

*Potamogeton*.

Esistono poi alcune piante ubiquitarie capaci cioè di svolgere le stesse funzioni sia sommerse che all'asciutto. Nelle acque marine vivono in grande prevalenza alghe e solo pochissime fanerogame tra cui la *Posidonia oceanica*; nelle acque dolci si annoverano specie come: *ninfee*, *cannuccia di palude*, *scirpi*, *carici*, *lenticchie d'acqua*, *potamogeti*, *tife mariofilli*, *spargani*, ecc.



### 1.3 La fotosintesi

Gli autotrofi e in particolare le piante verdi presentano due processi biologici fondamentali quali la fotosintesi e la respirazione.

La fotosintesi è un processo complesso e implica reazioni fotochimiche e biochimiche, negli ambienti acquatici, essa è svolta fundamentalmente dal fitoplancton, da peryfiton, dalle macrofite, nonché dai batteri fotosintetici.

La fotosintesi permette la sintesi dei carboidrati a partire da anidride carbonica e acqua in presenza della luce solare, cioè l'energia luminosa è assorbita e immagazzinata sotto forma di sostanze chimiche ad alto livello energetico; durante tale processo si ha il rilascio nell'ambiente di ossigeno (AA.VV. ,1990).

La demolizione metabolica delle sostanze immagazzinate fornisce alla pianta l'energia necessaria per i processi di accrescimento e per la sintesi dei lipidi, delle proteine, dei polisaccaridi, degli acidi nucleici, ecc., con il conseguente rilascio di anidride carbonica.

L'energia luminosa, per potere essere utilizzata in qualsiasi processo, anche nella fotosintesi, deve poter essere assorbita, ciò richiede un appropriato composto capace di assorbire la luce.

Questo composto, capace di assorbire la luce, è un pigmento e si trova nei cloroplasti.

I cloroplasti sono organuli in cui avviene la fotosintesi grazie alla presenza di pigmenti fotosintetici; tra questi la *clorofilla a* è il pigmento fondamentale, presente in tutti gli organismi autotrofi.

In seguito, in figura 6, è riportata un'immagine al microscopio di un cloroplasto.

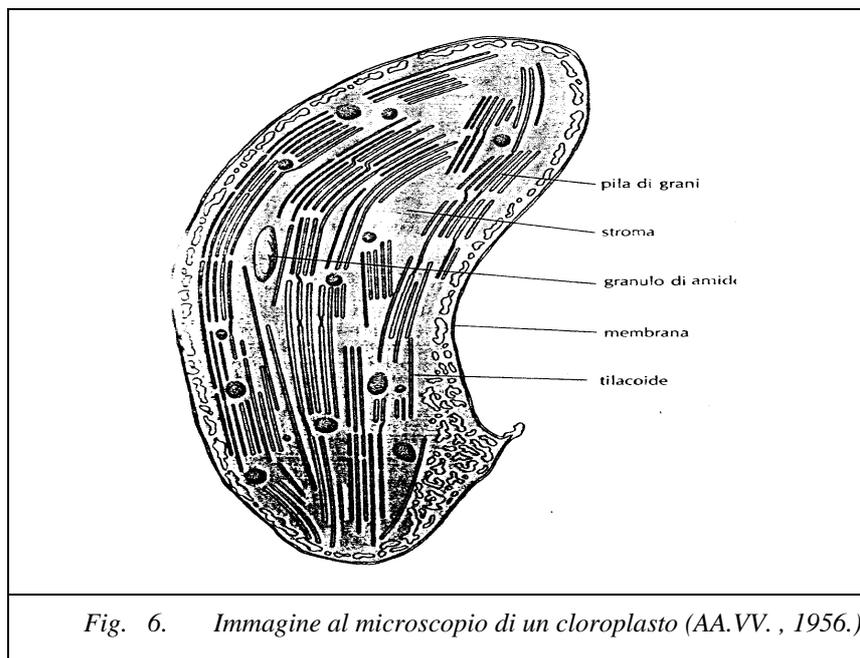


Fig. 6. Immagine al microscopio di un cloroplasto (AA.VV. , 1956.)

Il cloroplasto (figura 6) è limitato da una doppia membrana esterna (due membrane separate da uno stretto intervallo), simile ad quella del mitocondrio. L'interno del cloroplasto contiene molteplici strati di membrane. La clorofilla è localizzata in queste membrane.

Le membrane adiacenti si incurvano e si saldano ai loro bordi, formando un sacco appiattito detto tilacoide.

I tilacoidi delle piante superiori si aggregano tipicamente in gruppi che assomiglio a pile di frittelle, detti pile di grani. Alcune membrane dei tilacoidi, dette lamelle intergranarie, si estendono da un pila di grani un'altra all'interno del cloroplasto.

La microscopia elettronica dei tilacoidi, rivela cospicue schiere di particelle all'interno delle membrane. Si ritiene che esse rappresentino proteine e aggregati proteina-clorofilla che intervengono nella cattura e nella conversione dell'energia.

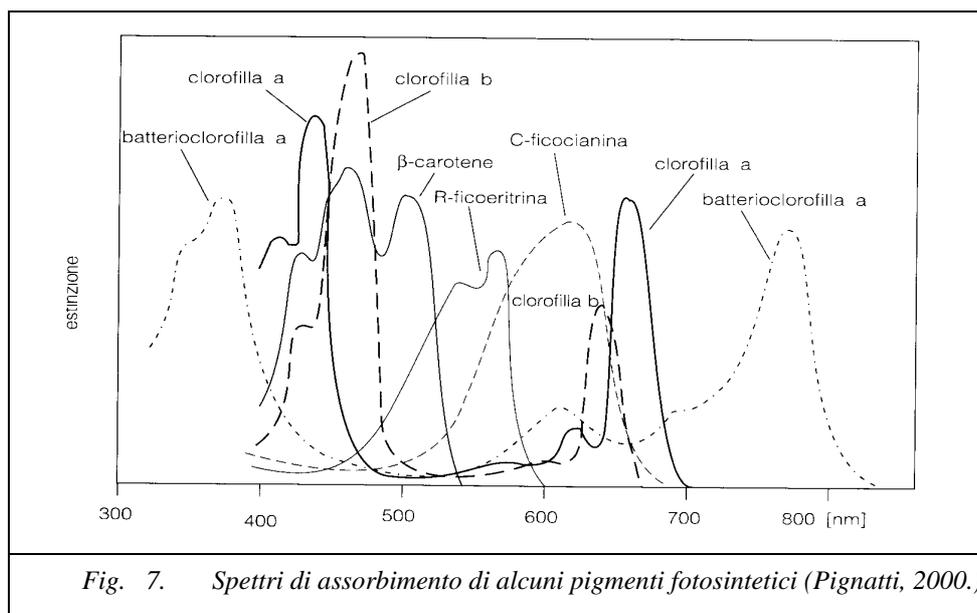
La regione del cloroplasto situata tra le pile di grani o all'esterno dei tilacoidi è detta stroma.

Lo stroma, contiene gli enzimi per la conversione dell'anidride carbonica in carboidrato; questi enzimi sfuggono rapidamente dal cloroplasto se la sua membrana viene danneggiata.

I pigmenti fotosintetici nelle membrane dei tilacoidi insieme agli altri pigmenti, le clorofille b e c carotenoidi e le ficobiline, ancorati sulle membrane dei tilacoidi sono raggruppati in unità fotosintetiche (fotosistemi PSI e PSII) (Pignatti, 1990).

In entrambi i fotosistemi, i pigmenti assorbono l'energia luminosa e la trasferiscono dal pigmento con massimo di assorbimento a minore lunghezza d'onda al pigmento con massimo di assorbimento a maggiore lunghezza d'onda fino alla cosiddetta trappola di energia (AA.VV., 2000).

La clorofilla a è l'unico pigmento capace di convertire l'energia luminosa in energia chimica e rappresenta perciò il pigmento fondamentale per la fotosintesi, le clorofille b e c, i carotenoidi e le ficobiline agiscono come pigmenti accessori trasferendo l'energia di eccitazione alla clorofilla a; essi assorbono la luce in parti dello spettro non interessate dall'assorbimento della clorofilla a colmando in parte il buco verde e ampliando così lo spettro delle radiazioni utili per la fotosintesi, (figura 7).



Il trasferimento dell'energia dalla clorofilla b alla clorofilla a è molto efficiente: i carotenoidi sono invece trasportatori di energia di eccitazione relativamente poco efficienti, ma esplicano una funzione molto importante proteggendo la clorofilla contro l'effetto ossidante dell'ossigeno molecolare (Pignatti, 2000).

Il sistema di pigmenti del PS II comprende praticamente tutti i pigmenti accessori, la maggior parte se non tutta la clorofilla b, diverse forme di clorofilla a ed una molecola di clorofilla a che funziona da trappola dell'energia e costituisce il centro di reazione del fotosistema; questa molecola è definita P690 perché il suo massimo assorbimento è a 690 nm (fig. 8).

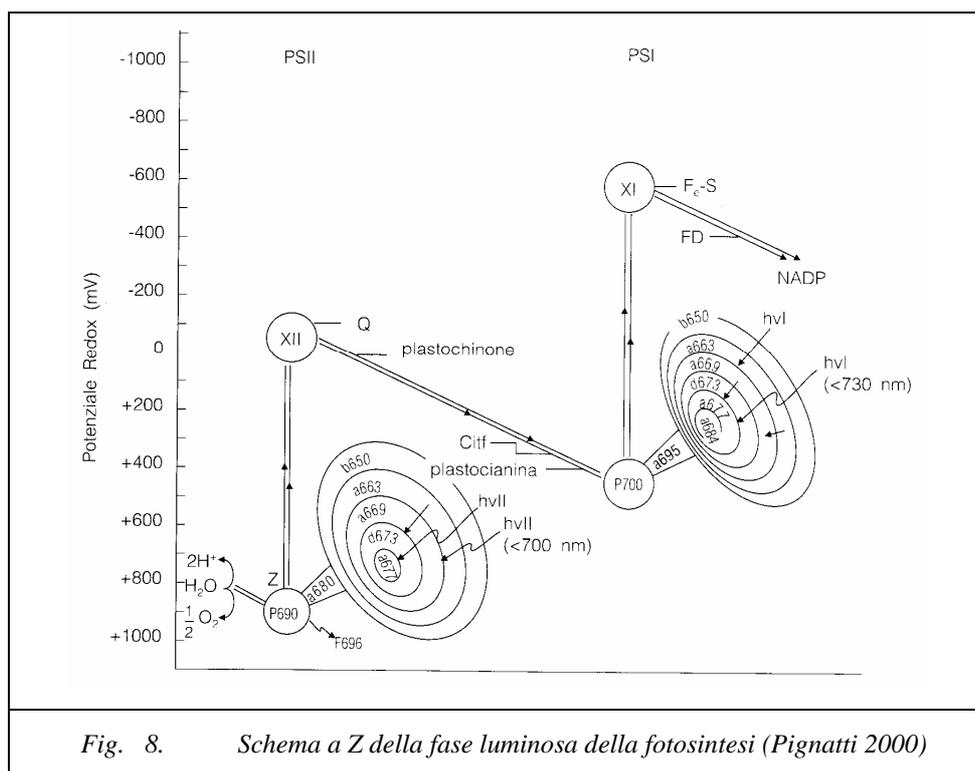


Fig. 8. Schema a Z della fase luminosa della fotosintesi (Pignatti 2000)

Nel sistema di pigmenti del PS I la clorofilla b è presente in piccole quantità o manca del tutto, sono presenti 4 forme di clorofilla a che si trovano anche nel PS II una clorofilla a con massimo di assorbimento a 695 nm e la molecola trappola del centro di reazione chiamata P 700 (fig.8).

## 1.4 Modellazione della qualità

Nella pianificazione e gestione delle risorse idriche di un bacino idrografico, il sistema fluviale, secondo l'attuale normativa in materia, viene posto al centro dell'intero contesto ambientale come recettore degli input derivanti dalle azioni antropiche e naturali.

Per la complessità nella gestione del bacino idrografico, strumenti di analisi di tipo avanzato, quali sono i modelli matematici, occupano un ruolo fondamentale come sistema di supporto alle decisioni, che il gestore della risorsa idrica è chiamato ad assumere.

I modelli matematici, sono disponibili con un alto grado di affidabilità ed una discreta facilità d'uso non solo per quanto riguarda la modellazione idraulica, ma anche nella modellazione della qualità delle acque.

La modellazione consente di simulare il comportamento dei processi fisici, chimici e biochimici che si sviluppano nel sistema fluviale, interpretando il fenomeno dell'autodepurazione naturale dei corpi idrici, permettendo di decidere dove intervenire per attenuare i fenomeni di inquinamento, sia derivanti da sorgenti di tipo puntuale che di tipo diffuso.

*Le sorgenti puntuali* includono non solo gli effluenti provenienti dagli impianti di trattamento civili e industriali e quelli provenienti dagli impianti di fitodepurazione ma anche tutte quelle immissioni di inquinanti discretizzabili dovute a condotte di qualunque genere, a scarichi da carri-botte, immissioni dovute ad affluenti o ad altri corsi d'acqua minori, come i canali di bonifica, che recapitano le loro acque in corpi idrici di maggiori dimensioni, e così via.

*Le sorgenti diffuse* sono i carichi inquinanti generati dalla rimozione dal suolo degli inquinanti stessi ad opera del ruscellamento superficiale delle acque di pioggia che cadono in un bacino drenante, carichi inquinanti di tipo agricolo, ma anche su bacini drenanti urbani. Altre sorgenti diffuse, che possono incrementare l'apporto di carichi inquinanti in un corpo idrico, sono l'infiltrazione di acque sotterranee, la deposizione atmosferica e la disgregazione delle rocce e dei suoli.

Le sorgenti diffusive possono essere ulteriormente distinte in sorgenti *lineari*, *areali* o *volumetriche* a seconda che esse si sviluppino prevalentemente lungo una linea, secondo

una superficie ovvero secondo un volume (Sirini, 2002).

Nel contesto della modellazione della qualità dei corpi idrici, il caso più semplice è il modello del bilancio delle sostanze carboniose, che rispecchia la teoria di Streeter e Phelps (1925), questo è in grado di descrivere semplicemente la *saccatura* di ossigeno disciolto a valle di uno scarico puntuale di sostanze biodegradabili.

Successivamente, al modello di Streeter e Phelps, sono stati sviluppati modelli più complessi che hanno preso in considerazione oltre alle sostanze carboniose i composti dell'azoto, del fosforo, nonché il contributo della fotosintesi e della respirazione degli autotrofi, ecc..(Marsilli, 1989)

Oggi il *QUAL2E* (Brown e Barnwell, 1987) e il *QUAL2K* (Chapra et al., 2003), per la completezza delle componenti incluse, sono considerati lo standard mondiale della modellistica della qualità fluviale, entrambi modelli sono disponibili gratuitamente sul sito dell'Agenzia di Protezione Ambientale degli Stati Uniti (USEPA) (Azzellino-Vismara, 2007).

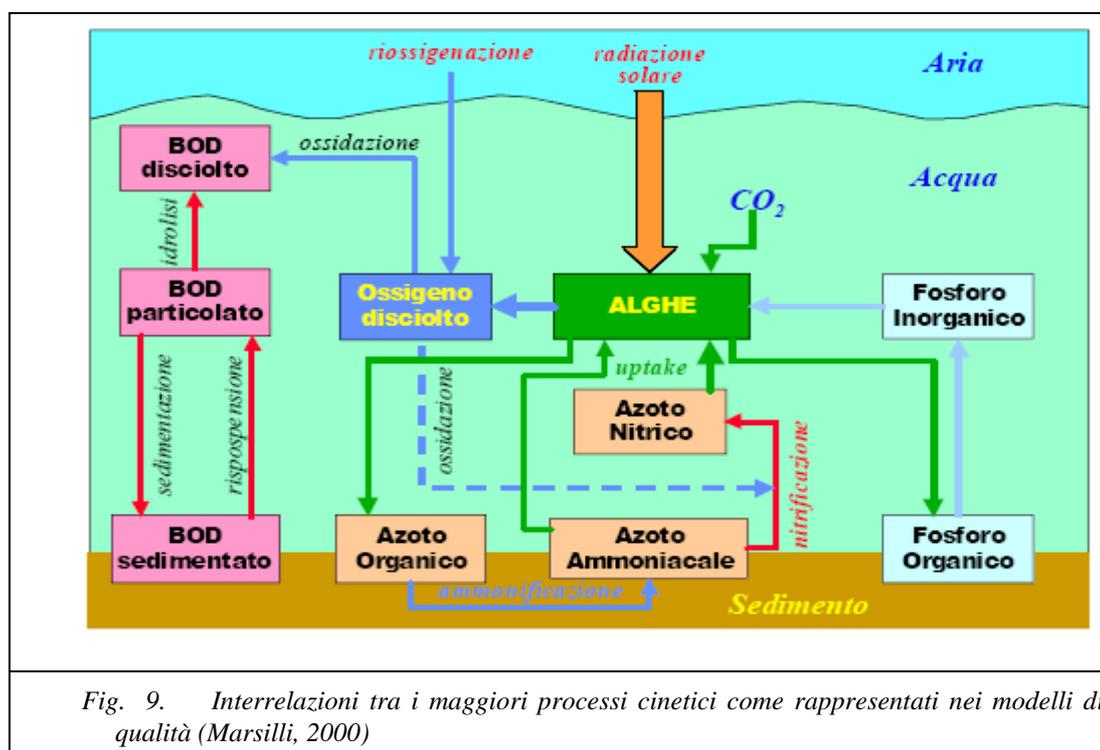


Fig. 9. Interrelazioni tra i maggiori processi cinetici come rappresentati nei modelli di qualità (Marsilli, 2000)

Le componenti principali che intervengono nella depurazione naturale sono illustrate nella figura 9, in essa, sono riportate schematicamente le interrelazioni intercorrenti fra i processi cinetici più rappresentativi della depurazione naturale, che coinvolgono il BOD e l'OD nella colonna d'acqua, così come essi vengono rappresentati nella modellazione di qualità fluviale, ovvero: *ossidazione del carbonio organico, ossidazione dell'azoto (nitrificazione), domanda di ossigeno dei sedimenti, riareazione, fotosintesi e respirazione.*

Nel contesto della modellazione della qualità delle acque un ruolo molto spesso trascurato è quello che svolge la componente autotrofa presente nella zona eufotica dei corpi idrici.

Il fitoplancton, il periphyton e le piante acquatiche possono influenzare in maniera significativa il livello di ossigeno disciolto nella colonna d'acqua attraverso i processi della fotosintesi e della respirazione.

La concentrazione di ossigeno disciolto è un fattore significativo nella valutazione dell'inquinamento dell'acqua, esso può fluttuare tra valori prossimi all'anossia, e in particolari condizioni, fino a valori di sovrasaturazione.

La concentrazione di ossigeno segue dei cicli diurni e stagionali in funzione del fotoperiodo, detti cicli nictemerali (Infusino,2010).

Si possono, inoltre, verificare picchi la cui estinzione è più o meno gradualmente; ciò in dipendenza delle caratteristiche del bacino, del grado di turbolenza delle acque ecc., sono stati infatti osservati fenomeni di isteresi nell'attività fotosintetica dovuti a fotoinibizione, riduzione della radiazione solare, ecc, che in genere si esauriscono in breve tempo (Marchetti e Provini, 1977).

Poiché la crescita del fitoplancton richiede la presenza di luce e nutrienti, per quantificare l'ossigeno prodotto per via fotosintetica occorre studiare la dinamica fitoplancton-nutrienti.

Comunque in molti modelli il problema viene affrontato in maniera semplificata per cui il tasso di produzione dell'ossigeno dovuto alla fotosintesi e la velocità con cui questo viene consumato dalla respirazione del fitoplancton (Bowie et al.1985), vengono fissati per cui il calcolo diventa indipendente dalla dinamica fitoplancton-nutrienti.

In questo caso il modello considera che la produzione media giornaliera di ossigeno dovuta alla fotosintesi e il consumo di questo dovuto alla respirazione siano in relazione secondo la formula:

$$\frac{dC}{dt} = (P - R) \quad \text{velocità di variazione della concentrazione dell'ossigeno}$$

dove :

$C$	concentrazione in fase liquida dell'ossigeno	(mg/l)
$P$	produzione media di ossigeno per via fotosintetica	(mg/lh)
$R$	consumo medio di ossigeno dovuto alla respirazione	(mg/lh)

In  $R$  viene considerato solo il contributo dovuto alla respirazione delle piante ed è quindi escluso il contributo dovuto alla respirazione dei microbi impegnati nella deossidazione carbonatica e nella nitrificazione.

## **CAPITOLO 2. BREVE STATO DELL'ARTE**

**2.1 La fotosintesi come produzione primaria**

**2.2 Metodi di misura della produzione di ossigeno per via fotosintetica**

**2.2.1 Metodi di impostazione teorica**

**2.2.2 Metodi di impostazione sperimentali**

**Introduzione.**

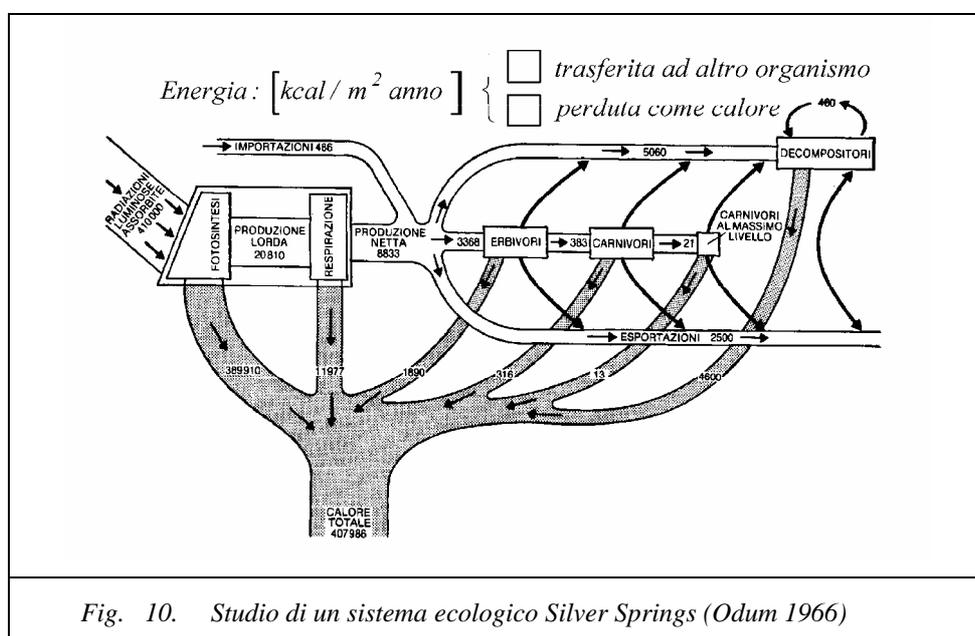
**Curve luce-fotosintesi - variabili principali**

**Modelli in letteratura**

## 2.1 La fotosintesi come produzione primaria

*Introduzione:* molto spesso la produzione di ossigeno è stata utilizzata per la misura delle produzioni primarie degli organismi eterotrofi di un sistema ecologico, una comunità o una parte di essa (Odum, 1956).

Il primo studio effettuato in tale direzione è dovuto a Odum (Odum,1966).



La fotosintesi dipende dalla luce, quindi essa si può sviluppare soltanto nello strato d'acqua fino al quale la luce riesce a penetrare.

Per questo motivo lo sviluppo algale avviene solamente nella zona eufotica.

La zona **eufotica** è lo strato compreso tra la superficie e la profondità rispetto alla quale non resta che l'1% (PAR) della luce incidente che colpisce la superficie, (Odum E.P.,1973).

Lo spessore di tale zona è notevolmente influenzato dall'opacità dell'acqua determinata dai materiali sospesi, tra cui vi sono: il plancton (la cui influenza è notevole soprattutto nei laghi e nei corsi d'acqua a bassa velocità), i materiali terrosi (argilla, fango, ecc.), le sostanze inquinanti immesse dagli scarichi antropici,

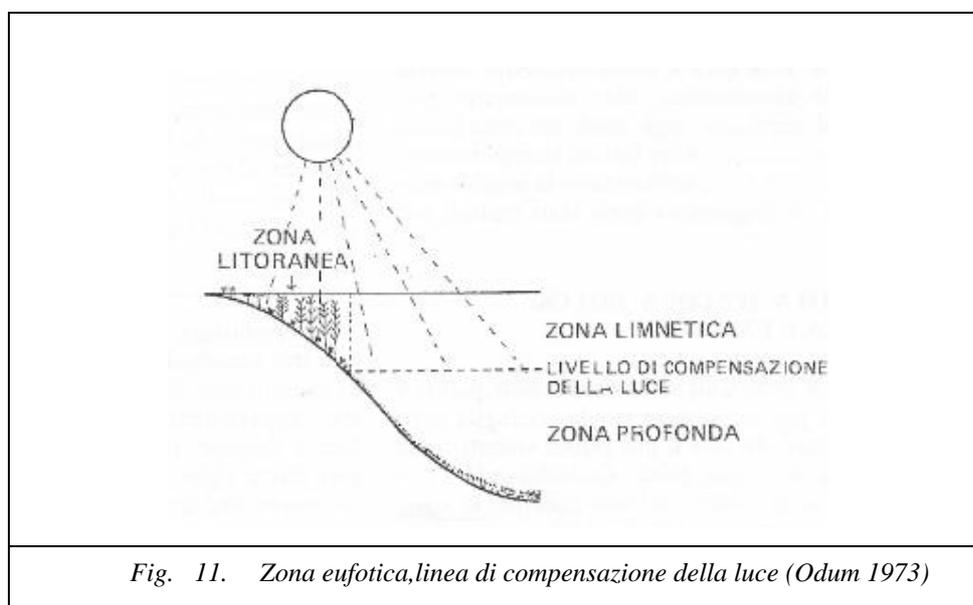
ecc. All'interno di tale spessore si troverà la profondità di compensazione dove si instaura l'equilibrio tra produzione e respirazione di ossigeno.

Lo spessore della zona eufotica, e quindi il punto di compensazione, presenta una spiccata variabilità in funzione del tempo e delle altre condizioni al contorno (Infusino, 2010).

Un modo semplice per misurare lo spessore in cui riesce a penetrare la luce, la zona eufotica, è quello di usare il disco di Secchi. Il disco di Secchi fu usato per la prima volta nel 1865 dall'abate A. Secchi in Mediterraneo, è semplicemente un disco bianco di 30 cm di diametro fissato ad una fune metrata, ed è usato molto nei laghi. Il disco di Secchi viene immerso in acqua e si misura la profondità alla quale esso diviene invisibile dalla superficie.

La trasparenza di un lago, e quindi la sua zona eufotica, è così definita come la profondità di scomparsa del disco di Secchi. La trasparenza dei laghi molto produttivi può anche essere inferiore ad 1 metro mentre nei laghi poco può essere di alcune decine di metri.

Alle nostre latitudini la trasparenza di un lago è massima nel periodo di minor produzione (inverno) e minima in estate-autunno.



Un altro modo per misurare lo spessore della zona eufotica, in cui la biomassa è dispersa uniformemente su tutta la colonna d'acqua, è quello di calcolare l'attenuazione della radiazione con la profondità attraverso la legge empirica di Lambert-Beer.

Essa correla la quantità di luce assorbita da un mezzo alla natura chimica, alla concentrazione ed allo spessore del mezzo attraversato:

$$I_{(Z)} = I_0(t)e^{-K_e Z}$$

dove:  $K_e$  è detto *coefficiente di estinzione* ed è una costante tipica del mezzo attraversato dalla lunghezza d'onda  $\lambda$  e  $Z$  è la profondità (o anche cammino ottico),  $I_0$  è la radiazione in superficie.

Detta l'assorbanza  $A$ :

$$A = \ln\left(\frac{I_0}{I_{(Z)}}\right)$$

E sostituendo la sua espressione nella precedente si ha :  $A = K_e Z$

La misura dello spessore massimo si ottiene, con una buona approssimazione, misurando l'assorbanza in spettrofotometria di campioni di acqua a 750 nm, misura valida nel giorno del solstizio d'estate e all'ora di massima intensità di luce (ore 12) con un cielo privo di nubi (Infusino,2009).

Tale spessore varia, inoltre, al variare dell'inclinazione solare (latitudine e stagioni) e della componente meteorologica.

La produzione di sostanza organica dipende, ovviamente anche, dalla disponibilità di materia inorganica, e in particolare di carbonio, ossigeno, idrogeno, azoto e fosforo. Questi possono risultare come fattori limitanti dell'ecosistema acquatico.

Tra i fattori limitanti, infatti, l'ossigeno che è presente nell'aria a una concentrazione del 21% in volume, che può essere considerata invariabile al livello del mare (potendo variare con la quota), nelle acque ha una solubilità, non altrettanto elevata.

La solubilità dell'ossigeno dell'acqua può variare in dipendenza di numerosi fattori, la sua concentrazione dipende oltre dalla temperatura (aumenta al diminuire della

temperatura), dalla presenza di sali disciolti e in minore misura dalla pressione atmosferica.

Si possono avere concentrazioni a saturazione alla pressione di 1 atm di 12,8 mg/l a una temperatura di 5°C e 9,2 mg/l a 20°C. La concentrazione, inoltre, può essere fortemente influenzata dagli scambi gassosi con l'atmosfera, dalla respirazione biologica degli organismi acquatici, dalla biodegradazione della sostanza organica e dalla fotosintesi di alghe e piante acquatiche.

Di contro l'anidride carbonica che è presente nell'aria a basse concentrazioni, è invece molto solubile in acqua.

L'anidride carbonica proveniente dall'atmosfera va ad aggiungersi a quella della respirazione delle piante e degli eterotrofi, a quella della decomposizione della materia organica e a quella chimica proveniente dai bicarbonati presenti nelle acque.

Un moderato aumento della CO<sub>2</sub> in acqua determina un aumento della fotosintesi mentre un eccesso è limitante per la vita acquatica, soprattutto dei pesci.

### La fotosintesi come produzione primaria.

La fotosintesi è il processo primario di ogni ecosistema perché, utilizzando la luce come sorgente di energia, opera la trasformazione delle sostanze inorganiche (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, N, P, K, ecc..) in composti organici (CH<sub>2</sub>O)<sub>n</sub>.

Come già specificato, la fotosintesi utilizza due comuni composti inorganici: anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) e acqua (H<sub>2</sub>O) oltre a nutrienti assorbiti dal terreno (N e P) per formare glucosio (C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>), rilasciando ossigeno (O<sub>2</sub>).

Riportando la reazione in forma semplificata della fotosintesi espressa come:



si legge in modo evidente che la produzione di ossigeno è solo un aspetto della fotosintesi, che rappresenta la dinamica di crescita dei produttori primari.

L'energia assorbita, infatti, è trasferita a diverse reazioni chimiche, che comportano l'utilizzo di alcuni specifici enzimi, che permettono, da una parte, di spezzare le molecole d'acqua e rilasciare ossigeno nell'atmosfera (1 g di clorofilla-a può produrre  $0,4 \div 4$  g  $O_2/h$ ), dall'altra di utilizzare idrogeno e anidride carbonica per costruire molecole di carboidrati (1 g  $O_2$  liberato corrisponde alla sintesi di circa 1 g di materia organica). I rapporti stechiometrici tra  $O/C$  e  $Clorofilla/C$  potenziali nella fotosintesi sono dati da:

$$r_{O/C} = 2,67 \quad gO / gC$$

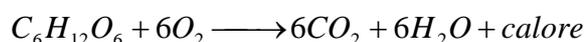
$$r_{Cla/C} = 25 \quad mgCla / mgC$$

Il primo permette di determinare quanto ossigeno è prodotto per via fotosintetica per ogni unità di carbonio assimilata e viceversa, il secondo quanta clorofilla è prodotta, per ogni unità di carbonio. Ciò consente di legare la produzione primaria direttamente alla produzione di ossigeno.

Gli autotrofi consumano parte dell'energia prodotta sia per mantenere il processo fotosintetico (sono spesi da 8160 a 14400 KJ per mole di glucosio prodotto, a seconda della lunghezza d'onda dei fotoni) che per mantenere le complesse molecole biologiche che costituiscono i tessuti (Infusino, 2009)

Tali processi metabolici avvengono con consumo di ossigeno, conseguente produzione di anidride carbonica e liberazione di energia sotto forma di calore.

La respirazione, quindi, comune anche agli eterotrofi è l'opposto della fotosintesi e la sua reazione, in forma semplificata, è la seguente:



Nel bilancio complessivo la quantità di ossigeno liberata è ovviamente maggiore di quella consumata; infatti, una pianta verde in 24 ore produce da 1/5 a 1/3 dell'anidride carbonica che nel medesimo lasso di tempo è fissata nei processi fotosintetici.

Per come già specificato, la stima della produzione primaria in ecologia è stata da sempre utilizzata per capire su quale flusso di energia possa contare un determinato ecosistema ai fini del proprio funzionamento (Susmel, 2001).

Quindi, con riferimento ad un determinato lasso di tempo, si definiscono (Odum, 1973):

Produzione primaria lorda (PPL)

(PPL) = Energia acquisita con la fotosintesi compresa la materia organica usata per la respirazione nel periodo di misura.

Produzione primaria netta (PPN)

(PPN) = PPL - energia spesa con la respirazione

Similmente si indica poi con:

Produzione di ossigeno lorda P

P= La quantità di ossigeno rilasciata per unità di volume nell'unità di tempo con la fotosintesi compresa quella spesa per la respirazione.

Produzione netta di ossigeno Pn

Pn = Quantità di ossigeno rilasciata per unità di volume nell'unità di tempo alle comunità autotrofe al netto della respirazione totale (P-R);

dove: R è la respirazione.

## 2.2 Metodi di misura della produzione di ossigeno per via fotosintetica

Lo sviluppo dei metodi di misura della produttività primaria ha permesso la normalizzazione di alcune metodologie per misurare la produzione di ossigeno degli autotrofi, alcuni di impostazione teorica alcuni di impostazione sperimentale.

Si fa una breve rassegna di alcuni dei metodi in letteratura, divisi secondo la loro impostazione teorica e secondo i parametri che considerano nel calcolo della produzione di ossigeno.

Tra i metodi di misura di impostazione teorica si possono distinguere : il metodo dell'ossigeno, il metodo di stima dei livelli di clorofilla e il metodo della misura della variazione della concentrazione diurna dell'ossigeno (EPA, 1995).

Possiamo distinguere :

Metodi diretti , metodo della bottiglia chiara e scura, metodi strumentali.

Metodi indiretti:

che tengono conto implicitamente della radiazione solare

- metodo di O'Connor and Di Toro;
- metodo della clorofilla;
- metodo delta;
- metodo monte valle;

che tengono conto esplicitamente della radiazione solare

- metodo di Blackmann;
- metodo di Baly;
- metodo di Smith;
- metodo di Steel;
- metodo di Webb;
- metodo di Platt;
- metodo di Jassby and Platt;
- metodo di Peeters & Eileers.

Quest'ultimi vengono denominati curve luce-fotosintesi (P/I).

### 2.2.1 Metodi di impostazione teorica

- Metodo della bottiglia chiara e della bottiglia scura, è uno dei primi tra i metodi teorici ad essere stato usato, per la misura della produzione di ossigeno negli ambienti acquatici. E' stato concepito da Gaarde e Grann nel 1925 (Odum, 1973), ormai assunto a metodo standard dalla comunità internazionale. Il metodo consiste nel prelevare a varie profondità campioni di acqua contenenti fitoplancton; con tali campioni si riempiono coppie di bottiglie, una delle quali (bottiglia scura) è avvolta con un foglio di carta nera o di alluminio per impedire l'ingresso della luce. Nelle bottiglie chiare, esposte alla luce solare, avviene sia la fotosintesi sia la respirazione, in quelle scure solo la respirazione. Dopo 24 ore si misura la concentrazione dell'ossigeno di ogni campione, e la si confronta con quella iniziale.
  
- Metodo della curva diurna, nelle acque correnti la produzione netta di ossigeno dell'intera comunità (Odum, 1956), si può determinare con il metodo della "curva diurna"; che consiste nella misura dell'ossigeno ad intervalli regolari durante le 24 ore. In questo modo si valuta la produzione durante il giorno al netto della respirazione e il consumo durante la notte di tutti gli autotrofi presenti (alghe, macrofite, ecc.). L'area delimitata dalla curva rappresenta la produzione netta poiché l'ossigeno utilizzato durante la notte è aggiunto a quello prodotto di giorno.
  
- Metodo monte valle, consiste nella comparazione tra i profili dell'ossigeno rilevate per 24 h in due stazioni distinte di un corso d'acqua. Da tale comparazione è possibile stimare la quantità di ossigeno per effetto della fotosintesi dell'intera comunità eterotrofa. (Odum, 1956).

- Metodo di O'Connor and Di Toro, la velocità di produzione dell'ossigeno fotosintetico è legata all'intensità dell'irraggiamento solare, poiché tale intensità descrive in genere durante il giorno una semi onda semisinusoidale, si fa l'ipotesi che la produzione di ossigeno fotosintetico sia rappresentata da un'onda simile e quindi che essa sia nulla durante la notte (O'Connor e Di Toro, 1970).
- Metodo della clorofilla, la produzione primaria e la produzione media di ossigeno possono essere stimate determinando la quantità di clorofilla posseduta dagli eterotrofi, in particolare la *clorofilla-a* è quella prevalente e costituisce circa l'1-2% del peso secco della sostanza organica delle alghe.
- metodo delta (Chapra & Di Toro, 1991), consiste nell'applicazione di una procedura per la stima della produzione di ossigeno prodotta per via fotosintetica, basata su un bilancio di massa in abbinamento con misurazioni diurne dell'ossigeno disciolto. Assumendo che il tasso di produzione per fotosintesi sia direttamente proporzionale all'energia luminosa, in modo tale che l'andamento dell'energia luminosa durante il ciclo diurno possa essere approssimato a una funzione semi-sinusoidale.
- metodo delta approssimato (Chapra & McBride, 2005), esso stima la produzione dell'ossigeno fotosintetico degli autotrofi acquatici, allo stesso modo del metodo delta, con una procedura basata sul bilancio di massa e su misurazioni diurne dell'ossigeno disciolto. Il metodo delta approssimato di Chapra & McBride (2005), però, si differenzia dal "metodo delta", riportato nel 1991 da Chapra e Di Toro, perché consente di evitare l'uso di grafici per la valutazione di alcuni parametri necessari alla stima della produzione fotosintetica.

### 2.2.2 Metodi di impostazione sperimentali

#### ▪ **Introduzione.**

Sono molti i metodi sperimentali, che impiegano direttamente la radiazione solare, per il calcolo della produzione di ossigeno per via fotosintetica, che in passato sono stati proposti.

Questi metodi, si basano sulla stima della produzione primaria (degli autotrofi acquatici, fitoplancton, periphyton e macrofite). Infatti, in letteratura la produzione primaria (degli autotrofi acquatici), viene modellata in relazione alla radiazione solare disponibile (tenendo anche in conto dell'influenza dell'attenuazione della luce alle varie profondità) e delle variabili ambientali, quali nutrienti, temperatura, che intervengono in tale processo. Questi modelli non entrano nei meccanismi fisiologici della fotosintesi. Bisogna premettere che nel caso si intende modellare la produzione fotosintetica delle alghe filamentose, bisogna analizzarne lo sviluppo sull'unità di superficie ( $m^2$ ).

Se s'intende modellare la produzione del fitoplancton, bisogna considerare la massa biologica dispersa nel volume d'acqua ( $m^3$ ), e analizzarne anche lo sviluppo sulla colonna d'acqua (zona eufotica), attraverso l'integrazione dell'equazione luce-fotosintesi, sull'intera profondità.

In letteratura la modellazione della produzione fotosintetica è eseguita attraverso l'uso delle cosiddette curve luce-fotosintesi, (P/I).

Le curve luce-fotosintesi permettono attraverso la stima di alcuni parametri, di cui se ne darà in seguito definizione, la stima della produzione giornaliera di ossigeno fotosintetico.

In seguito, dopo aver illustrato la rappresentazione matematica dei modelli (P/I), e delle variabili che essi utilizzano nelle loro equazioni, si esporranno alcuni dei modelli in letteratura.

### ▪ Curve luce-fotosintesi - variabili principali

Il processo di fotosintesi implica, come già detto, la conversione di carbonio inorganico (da acido carbonico) in carbonio organico (nella forma di glucosio) con la luce come fonte di energia.

La produzione dell'ossigeno fotosintetico il fitoplancton, è espresso in termini di massa di carbonio convertito (fissato) per unità di volume di acqua nell'unità di tempo,  $[M L^{-3} T^{-1}]$ , per le macrofite è espresso in termini di massa di carbonio convertito (fissato) per unità di area di acqua nell'unità di tempo  $[M L^{-2} T^{-1}]$ , (Platt & Sathyendranath, 1988).

L'ossigeno fotosintetico prodotto dagli autotrofi acquatici è indicato con il simbolo  $P$ . Si indica poi con  $B$  l'indice della biomassa degli autotrofi acquatici che prendono parte alla produzione dell'ossigeno fotosintetico,  $[M L^{-3}]$ .

Per calcolare produzione primaria, si fa riferimento alla biomassa-normalizzata  $P^B$ .

La produzione assoluta  $P$  può essere calcolata attraverso la relazione :

$$P = B \times P^B$$

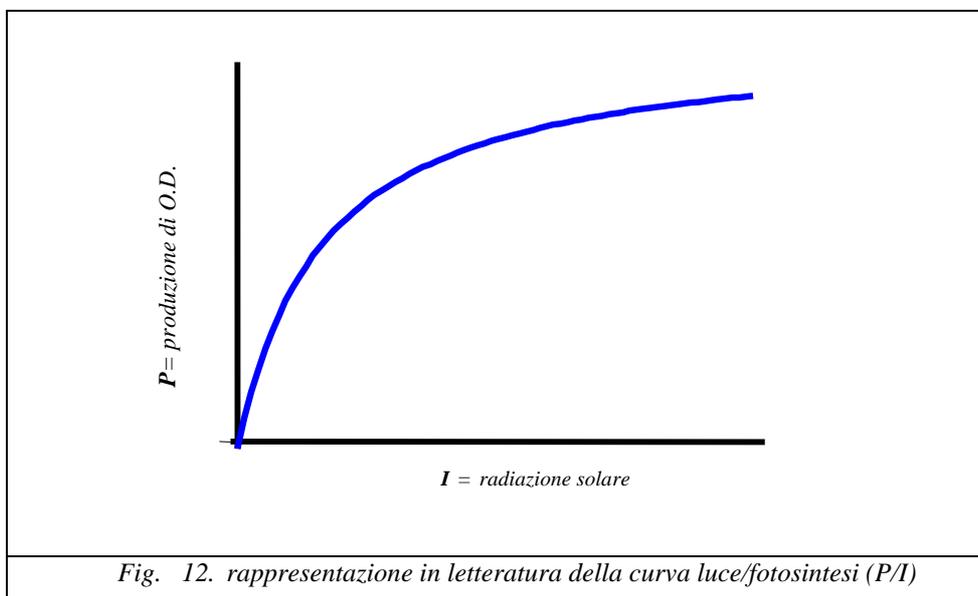
dove  $P^B$  è funzione della radiazione solare  $I$

$$P^B = P^B(I)$$

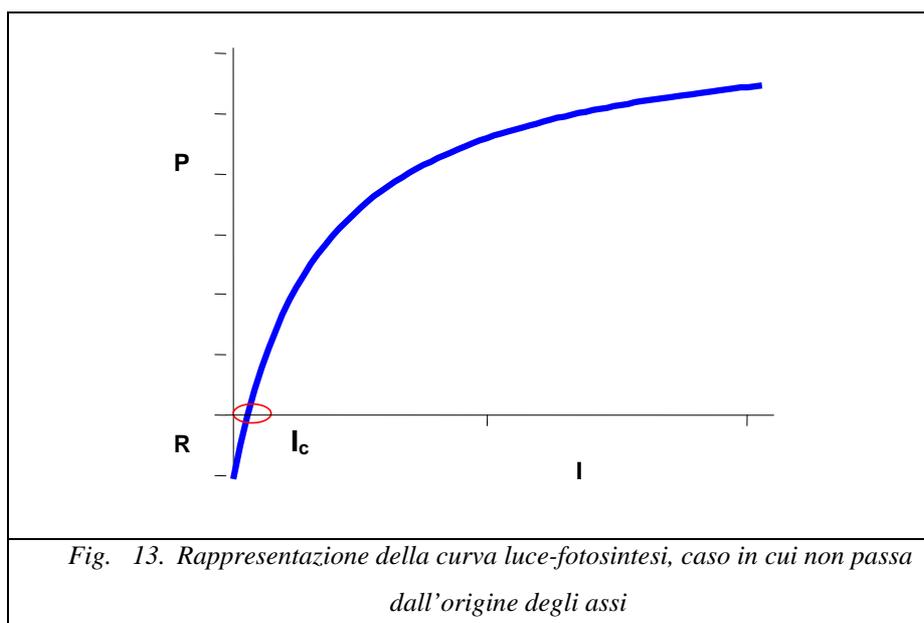
Le curve luce-fotosintesi possono essere costruite mettendo in relazione la produzione nell'unità di tempo normalizzata alla biomassa in funzione delle intensità di luce assorbite.

Queste curve consentono di comprendere i fattori che influiscono sull'attività fotosintetica del fitoplancton nel loro ambiente naturale (Frenette *et al.*, 1996).

Le curve luce fotosintesi,  $P/I$ , vengono rappresentate classicamente secondo un grafico, in cui sull'asse delle ascisse si riporta la radiazione solare e sull'asse delle ordinate viene rappresentata la produzione di ossigeno fotosintetico, (fig.12)



La curva non passa necessariamente attraverso l'origine, in tal caso l'intercetta sull'ordinata può essere interpretata come una misura della respirazione della componente autotrofa acquatica (perdita di carbonio, quando la fotosintesi è zero),  $R$ .



Il punto dove la curva, in figura 13, taglia l'ascissa, è detto punto di compensazione e fissa la radiazione  $I_c$ , per la quale la fotosintesi bilancia la respirazione notturna, (definita radiazione di compensazione).

Il caso più semplice di rappresentazione della curva (P/I) è quello di una curva di luce-saturazione a due-parametri con ( $R = 0$ ).

La curva può essere rappresentata da un'equazione del tipo :

$$P(I) = f(I; \alpha; P_M)$$

rappresentazione generale della curva di luce-saturazione.

Quando l'equazione è applicata a condizioni di campo per il calcolo della produzione dell'ossigeno, il valore di  $I$  che deve essere usato sarà la radiazione solare ad una particolare profondità  $z$  nella colonna d'acqua.

La curva luce-fotosintesi è caratterizzata, quindi, da due parametri,  $\alpha$  pendenza iniziale della curva, e  $P_M$  massima produzione fotosintetica nell'unità di tempo .

Le unità di misura tipiche, in letteratura, per  $\alpha$  e  $P_M$  sono :

$$\alpha \quad [\text{mgC}/(\text{mg Chla}) \cdot (\text{watt}/\text{m}^2) \cdot \text{h}];$$

$$P_M \quad [\text{mg C}/(\text{mg Chla}) \cdot \text{h}]$$

Nel tratto iniziale, a basse radiazioni, la curva è quasi-lineare, per radiazioni solari crescenti, la pendenza della curva decresce progressivamente fino a formare un asintoto orizzontale. Proiettando, figura 14, il punto di intersezione dell'asintoto orizzontale, sull'asse delle ascisse, si individua il punto  $I_S$ , indicato da Talling, come parametro di fotoadattazione (Talling 1957).

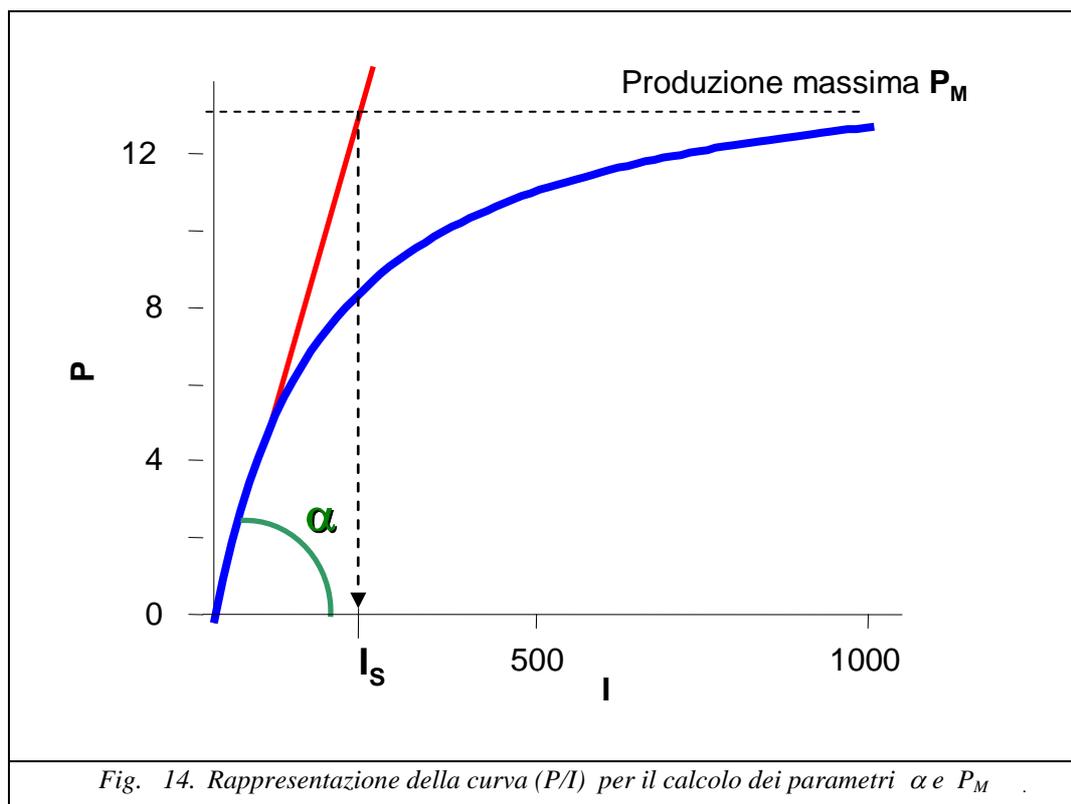


Fig. 14. Rappresentazione della curva (P/I) per il calcolo dei parametri  $\alpha$  e  $P_M$ .

Il parametro  $\alpha$  è definito da :

$$\left. \frac{\partial P}{\partial I} \right|_{I \rightarrow 0} = \alpha$$

Nelle ipotesi che non si verifichi fotoinibizione e quindi per :

$$I \rightarrow \infty, \quad P \rightarrow P_M$$

il parametro  $\alpha$ , è dato da :

$$\alpha = \frac{P_M}{I_S}$$

Da questo si ha :

$$I_S = \frac{P_M}{\alpha}$$

## ▪ Modelli in letteratura

Esiste una estesa bibliografia sulla modellazione della fotosintesi e respirazione degli autotrofi acquatici. Generalmente i modelli sono empirici nella loro natura, con la forma del modello talvolta suggerita dalla biochimica.

I modelli assumono che la luce sia il solo substrato limitante la fotosintesi.

Questi modelli sono quelli che considereremo in questo paragrafo. La loro forma è stata suggerita dalla fisica o dalla biochimica del processo, ma sono comunque stati derivati da dati sperimentali.

Il nostro obiettivo principale è quello di stimare la fotosintesi degli autotrofi acquatici (stima di valori medi, giornalieri, ecc.).

Se misuriamo il tasso di fotosintesi in situazioni nelle quali la luce sia il fattore limitante, si possono ottenere modelli detti a saturazione, e modelli detti a fotoinibizione.

I modelli a saturazione, hanno una caratteristica forma rappresentata con diverse funzioni che includono esponenziali, iperboli rettangolari e iperboli non-rettangolari.

Queste funzioni producono un incremento lineare della fotosintesi quando la luce è a livelli bassi; si ha invece una risposta di “saturazione” ad alti livelli di luce, dove ulteriori incrementi di luce non producono incrementi nella fotosintesi.

Nei modelli a fotoinibizione, la tipica curva a saturazione, anziché delineare un plateau, piega verso il basso, oltre un certo limite della radiazione solare si osserva un decremento del tasso fotosintetico (zona fotoinibita). In questi casi la curva e le equazioni non sono più adatte a descrivere la produzione di ossigeno fotosintetico.

In ordine cronologico si riportano alcuni modelli in letteratura (Jassby and Plaat, 1976).

Il primo modello che stima la produzione fotosintetica da parte degli autotrofi acquatici è quello di Blackmann (1905). È questo la più semplice e la prima forma di espressione della relazione tra la produzione e la radiazione solare. Essa fu formulata da Blackman nel 1905 basandosi sul principio di Liebig, legge dei fattori

limitanti. C'è un valore minimo per il quale non si verifica la fotosintesi, un valore ottimale che mostra il tasso più elevato, e un valore massimo, oltre il quale la fotosintesi decresce.

Successivamente Baly (Baly, 1935), ha proposto la curva la descrizione della risposta fotosintetica degli autotrofi alla radiazione solare, con la stessa forma matematica che esprime la dipendenza della fotosintesi dai nutrienti inorganici. In essa compare il parametro  $I_{S(1)}$ , che è la radiazione per la quale il rateo di fotosintesi è pari a  $P_M/2$ , (Platt,1975).

Il modello di Smith (Smith,1936), propone un valore  $I_{S(2)}$ , che è la radiazione solare per la quale il rateo di fotosintesi è pari a  $P_M / \sqrt{2}$ , (Platt,1975) (Marsilli,1989).

La formula di Smith viene ripresa da Talling nel 1957 (Talling,1957), esso diede una nuova definizione, come già detto, al parametro  $I_S$ , definendolo come la proiezione sull'asse della ascisse, dell'intersezione della retta che individua la pendenza iniziale della curva con la linea che descrive il plateau raggiunto alla produzione massima.

Succesivi sono: il modello di Steel (Steel,1962), quello di Webb (Webb et al. 1974) e quello di Platt (Platt et al., 1975).

Tutti i modelli finora descritti sono a saturazione. Per quelli a fotoinibizione, si deve annoverare quello di Steel (Stell,1962), nel quale compare il parametro  $I_{S(3)}$ , nel modello di Steel  $I_{S(3)}$ , che è la radiazione per la quale il rateo di fotosintesi è pari  $P_{opt}$ .

Peeter & Eileers (Peeter & Eileers, 1988) hanno proposto un modello dinamico che descrive la relazione tra luce e fotosintesi sulla base delle velocità e probabilità di transizione tra stati stazionari, stati attivati e fotoinibiti dei diversi fotosistemi.

Gli autori individuano un sistema di equazioni differenziali lineari per descrivere il passaggio dei fotosistemi dallo stato stazionario a quello attivato e, da questo, il ritorno ad uno stato stazionario o la transizione a uno stato di inibizione.

La relazione che lega produzione ed intensità di radiazione è la seguente:

$$P = I / (aI^2 + bI + c)$$

Per valori di radiazioni solari bassi,  $aI^2$  e  $bI$  possono essere trascurati e il tasso di produzione s'incrementa in modo lineare con la radiazione solare.

Quando invece la radiazione è alta,  $aI^2$  prevale ed il tasso di produzione è inversamente proporzionale alla radiazione solare. Eilers & Peeters (1988) hanno ricavato i parametri caratteristici delle curve luce-fotosintesi espresse attraverso i parametri  $a$ ,  $b$  e  $c$ .

In seguito si riportano le equazioni dei modelli in letteratura, precedentemente definiti, riportandone per ognuno le variabili che ne permettono la descrizione matematica (Graham McBride,1992) (Aalderink Jovin, 1997).

### Formula di Blackman (1905)

<i>Tabella 1. modello a due parametri di Blackmann (1905) [curva luce-fotosintesi (P/I)] modello a saturazione</i>				
<i>anno</i>	<i>Autore</i>	<i>Equazione canonica</i>	<i>Eq. in funzione di <math>I_s</math></i>	<i>parametro di fotoadattamento</i>
(1905)	Blackmann	$P^B = \begin{cases} \alpha \cdot I, & I \leq P_m^B / \alpha \\ P_m^B, & I > P_m^B / \alpha \end{cases}$	$P(I) = \begin{cases} P_M \cdot I / I_s, & I \leq I_s \\ P_M, & I > I_s \end{cases}$	$I_s = \frac{P_M}{\alpha}$
$P(I)$	produzione ossigeno fotosintetico ( $mgO_2 / mg\ Cl a \cdot h$ )			
$P_M$	massima produzione ossigeno fotosintetico ( $mgO_2 / mg\ Cl a \cdot h$ )			
$I$	radiazione solare istantanea ( $watt/m^2$ )			
$\alpha$	pendenza iniziale della curva ( $mgO_2 / mgCl a \cdot h$ ) / ( $watt/m^2$ )			
$I_s$	(parametro di Talling) ( $watt/m^2$ ), è la radiazione per la quale il rateo di fotosintesi è pari a $P_M$			

Tab. 1: Modello di Blackmann (1905)

**Formula di Baly (1935)**

<i>Tabella 2_ modello a due parametri di Baly (1935)_ [curva luce-fotosintesi (P/I)] modello a saturazione</i>				
<i>anno</i>	<i>Autore</i>	<i>Equazione canonica</i>	<i>Eq. in funzione di I<sub>s</sub></i>	<i>parametro di fotoadattamento</i>
(1935)	Baly	$P^B = P_m^B \cdot \frac{\alpha \cdot I}{(P_m^B + \alpha \cdot I)}$	$P(I) = P_M \cdot \frac{(I/I_{S(1)})}{[1 + (I/I_{S(1)})]}$	$I_{S(1)} = \frac{P_M / 2}{\alpha}$
<p><i>P(I)</i> produzione ossigeno fotosintetico ( mgO<sub>2</sub>/ mg Cla * h)</p> <p><i>P<sub>M</sub></i> massima produzione ossigeno fotosintetico ( mgO<sub>2</sub>/mg Cla * h)</p> <p><i>I</i> radiazione solare istantanea (watt/m<sup>2</sup>)</p> <p><i>α</i> pendenza iniziale della curva ( mgO<sub>2</sub>/mgCla * h) / (watt/m<sup>2</sup>)</p> <p><i>I<sub>S(1)</sub></i> (parametro di Talling) (watt/m<sup>2</sup>), è la radiazione per la quale il rateo di fotosintesi è pari a <i>P<sub>M</sub></i> / 2</p>				

Tab. 2: Modello di Baly (1935)

**Formula di Smith (1936)**

<i>Tabella 3_ modello a due parametri di Smith (1936)_ [curva luce-fotosintesi (P/I)] modello a saturazione</i>				
<i>anno</i>	<i>Autore</i>	<i>Equazione canonica</i>	<i>Eq. in funzione di I<sub>s</sub></i>	<i>parametro di fotoadattamento</i>
(1936)	Smith	$P^B = P_m^B \cdot \frac{\alpha \cdot I}{[(P_m^B)^2 + (\alpha \cdot I)^2]^{1/2}}$	$P(I) = P_M \cdot \frac{(I/I_{S(2)})}{[1 + (I/I_{S(2)})^2]}$	$I_{S(2)} = \frac{P_M / \sqrt{2}}{\alpha}$
<p><i>P(I)</i> produzione ossigeno fotosintetico ( mgO<sub>2</sub>/ mg Cla * h)</p> <p><i>P<sub>M</sub></i> massima produzione ossigeno fotosintetico ( mgO<sub>2</sub>/mg Cla * h)</p> <p><i>I</i> radiazione solare istantanea (watt/m<sup>2</sup>)</p> <p><i>α</i> pendenza iniziale della curva ( mgO<sub>2</sub>/mgCla * h) / (watt/m<sup>2</sup>)</p> <p><i>I<sub>S(2)</sub></i> (parametro di Talling) (watt/m<sup>2</sup>), è la radiazione per la quale il rateo di fotosintesi è pari a <i>P<sub>M</sub></i> / √2</p>				

Tab. 3: Modello di Smith (1936)

**Formula di Talling (1957)**

<i>Tabella 4_ modello a due parametri di Talling (1957) [curva luce-fotosintesi (P/I)] modello a saturazione</i>				
<i>anno</i>	<i>Autore</i>	<i>Equazione canonica</i>	<i>Eq. in funzione di I<sub>S</sub></i>	<i>parametro di fotoadattamento</i>
(1957)	Talling	$P^B = P_m^B \cdot \frac{\alpha \cdot I}{(P_m^B + \alpha \cdot I)}$	$P(I) = P_M \cdot \frac{(I/I_{S(I)})}{[1 + (I/I_{S(I)})]}$	$I_S = \frac{P_M}{\alpha}$
<p><i>P(I)</i> produzione ossigeno fotosintetico ( mgO<sub>2</sub>/ mg Cla * h)</p> <p><i>P<sub>M</sub></i> massima produzione ossigeno fotosintetico ( mgO<sub>2</sub>/mg Cla * h)</p> <p><i>I</i> radiazione solare istantanea (watt/m<sup>2</sup>)</p> <p><i>α</i> pendenza iniziale della curva ( mgO<sub>2</sub>/mgCla * h) / (watt/m<sup>2</sup>)</p> <p><i>I<sub>S</sub></i> (parametro di Talling) (watt/m<sup>2</sup>), è la radiazione per la quale il rateo di fotosintesi è pari a <i>P<sub>M</sub></i></p>				

Tab. 4: Modello di Talling(1957)

**Formula di Steel (1962)**

<i>Tabella 5_ modello a due parametri di Steel(1962) [curva luce-fotosintesi (P/I)] modello a saturazione</i>				
<i>anno</i>	<i>Autore</i>	<i>Equazione canonica</i>	<i>Eq. in funzione di I<sub>S</sub></i>	<i>parametro di fotoadattamento</i>
(1962)	Steel	$P^B = \alpha \cdot I \cdot \exp(-\alpha \cdot I / P_m^B \cdot e)$	$P(I) = P_M \cdot (I / I_S) \cdot \exp(1 - I / I_S)$	$I_S = \frac{P_M}{\alpha}$
<p><i>P(I)</i> produzione ossigeno fotosintetico ( mgO<sub>2</sub>/ mg Cla * h)</p> <p><i>P<sub>M</sub></i> massima produzione ossigeno fotosintetico ( mgO<sub>2</sub>/mg Cla * h)</p> <p><i>I</i> radiazione solare istantanea (watt/m<sup>2</sup>)</p> <p><i>α</i> pendenza iniziale della curva ( mgO<sub>2</sub>/mgCla * h) / (watt/m<sup>2</sup>)</p> <p><i>I<sub>S</sub></i> (parametro di Talling) (watt/m<sup>2</sup>), è la radiazione il rateo di fotosintesi è pari a <i>P<sub>M</sub></i></p>				

Tab. 5: Modello di Steel (1962)

**Formula di Steel modified. (1962)**

Tabella 6_ modello a due parametri di Steel modified.(1962) [curva luce-fotosintesi (P/I)] modello a fotoinibizione		
Autore e anno	Equazione canonica	Eq. in funzione di $I_s$
Steel modified (1962)	$P^B = \begin{cases} \alpha \cdot I \exp(-\alpha I / P_m^B \cdot e), & I \leq \frac{P_m^B \cdot e}{\alpha} \\ P_m^B & , I > \frac{P_m^B \cdot e}{\alpha} \end{cases}$	$P(I) = \begin{cases} P_M \cdot (I / I_{S(3)}) \exp(1 - I / I_{S(3)}), & I \leq I_{S(3)} \\ P_M & , I > I_{S(3)} \end{cases}$
$I_{S(3)} = \frac{P_M}{\alpha}$		
$P(I)$	produzione ossigeno fotosintetico ( mgO <sub>2</sub> / mg Cla * h)	
$P_M$	massima produzione ossigeno fotosintetico ( mgO <sub>2</sub> /mg Cla * h)	
$I$	radiazione solare istantanea (watt/m <sup>2</sup> )	
$\alpha$	pendenza iniziale della curva ( mgO <sub>2</sub> /mgCla * h) / (watt/m <sup>2</sup> )	
$I_{S(3)}$	(parametro di Talling) (watt/m <sup>2</sup> ), è la radiazione per la quale il rateo di fotosintesi è pari alla prod. ottimale.	

Tab. 6: Modello di Steel modified. (1962)

**Formula di Webb et al (1974)**

Tabella 7_ modello a due parametri di Webb et al.(1974) [curva luce-fotosintesi (P/I)] modello a saturazione				
anno	Autore	Equazione canonica	Eq. in funzione di $I_s$	parametro di fotoadattamento
(1974)	Webb et al.	$P^B = P_m^B [1 - \exp(-\alpha \cdot I / P_m^B)]$	$P(I) = P_M [1 - \exp(-I / I_s)]$	$I_s = \frac{P_M}{\alpha}$
$P(I)$	produzione ossigeno fotosintetico ( mgO <sub>2</sub> / mg Cla * h)			
$P_M$	massima produzione ossigeno fotosintetico ( mgO <sub>2</sub> /mg Cla * h)			
$I$	radiazione solare istantanea (watt/m <sup>2</sup> )			
$\alpha$	pendenza iniziale della curva ( mgO <sub>2</sub> /mgCla * h) / (watt/m <sup>2</sup> )			
$I_s$	(parametro di Talling) (watt/m <sup>2</sup> ), è la radiazione il rateo di fotosintesi è pari a $P_M$			

Tab. 7: Modello di Webb et al (1974)

**Formula di Platt et al (1975)**

Tabella 8_ modello a due parametri di Platt et al. (1975)[curva luce-fotosintesi (P/I)] modello a saturazione		
Autore e anno	Equazione canonica	Eq. in funzione di $I_s$
Platt et al. modified (1975)	$P^B = \begin{cases} \alpha \cdot I - \frac{(\alpha \cdot I)^2}{4P_m^B}, & I \leq \frac{2 \cdot P_m^B}{\alpha} \\ P_m^B I, & I > \frac{2 \cdot P_m^B}{\alpha} \end{cases}$	$P(I) = \begin{cases} P_M \left[ \frac{I}{I_s} - 0.25 \cdot \left( \frac{I}{I_s} \right)^2 \right], & I \leq 2I_s \\ P_M, & I > 2I_s \end{cases}$
$I_s = \frac{P_M}{\alpha}$		
$P(I)$	produzione ossigeno fotosintetico ( mgO <sub>2</sub> / mg Cla * h)	
$P_M$	massima produzione ossigeno fotosintetico ( mgO <sub>2</sub> /mg Cla * h)	
$I$	radiazione solare istantanea (watt/m <sup>2</sup> )	
$\alpha$	pendenza iniziale della curva ( mgO <sub>2</sub> /mgCla * h) / (watt/m <sup>2</sup> )	
$I_s$	(parametro di Talling) (watt/m <sup>2</sup> ), è la radiazione per la quale il rateo di fotosintesi è pari a $P_M$	

Tab. 8: Modello di Platt et al. (1975)

**Formula di Jassby and Platt (1976)**

Tabella 9_ modello a due parametri di Jassby and Platt (1976)_ [curva luce-fotosintesi (P/I)] modello a saturazione				
anno	Autore	Equazione canonica	Eq. in funzione di $I_s$	parametro di fotoadattazione
(1976)	Jassby and Platt	$P^B = P_m^B \tanh(\alpha \cdot I / P_m^B)$	$P(I) = P_M \tanh \cdot (I / I_s)$	$I_s = \frac{P_M}{\alpha}$
$P(I)$	produzione ossigeno fotosintetico ( mgO <sub>2</sub> / mg Cla * h)			
$P_M$	massima produzione ossigeno fotosintetico ( mgO <sub>2</sub> /mg Cla * h)			
$I$	radiazione solare istantanea (watt/m <sup>2</sup> )			
$\alpha$	pendenza iniziale della curva ( mgO <sub>2</sub> /mgCla * h) / (watt/m <sup>2</sup> )			
$I_s$	(parametro di Talling) (watt/m <sup>2</sup> ), è la radiazione per la quale il rateo di fotosintesi è pari a $P_M$			

Tab. 9: Modello di Jassby and Platt (1976)

**Formula di Peeters & Eilers (1988)**

<i>Tabella 10_ modello di Peeters &amp; Eileers _ [curva luce-fotosintesi (P/I)] modello a fotoinibizione</i>				
<i>anno</i>	<i>Autore</i>	<i>Equazione canonica</i>		
(1988)	Peeters and Eileers	$P = \frac{I}{a \cdot I^2 + b \cdot I + c}$	$\alpha = \frac{1}{c}$ $I_{opt} = \sqrt{\frac{c}{a}}$ $I_s = \frac{c}{b + 2\sqrt{ac}}$	$c = \frac{1}{\alpha}$ $a = \frac{1}{\alpha \cdot I_{opt}^2}$ $b = \frac{1}{P_M} - \frac{2}{\alpha \cdot I_{opt}^2}$
$P(I)$	produzione ossigeno fotosintetico ( mgO <sub>2</sub> / mg Cla * h)			
$P_M$	massima produzione ossigeno fotosintetico ( mgO <sub>2</sub> /mg Cla * h)			
$I$	radiazione solare istantanea (watt/m <sup>2</sup> )			
$\alpha$	pendenza iniziale della curva ( mgO <sub>2</sub> /mgCla * h) / (watt/m <sup>2</sup> )			
$I_{opt}$	è la radiazione ottimale alla quale si misura $P_M$ (watt/m <sup>2</sup> ),			
$I_s$	(parametro di Talling) (watt/m <sup>2</sup> ), è la radiazione per la quale il rateo di fotosintesi è pari a $P_{opt}$			

Tab. 10: Modello di Peeters & Eileers (1988)

## **CAPITOLO 3. MATERIALI E METODI**

- 3.1 Inquadramento geografico dei siti di ricerca**
- 3.2 Sperimentazione**
- 3.3 Campagne di campionamento e prove**
- 3.4 Costruzione di un prototipo di strumento all'uso della sperimentazione**
- 3.5 Costruzione di una camera di termostatazione**
- 3.6 PARTE 1° - sperimentazione fiume Busento - alghe filamentose**
- 3.7 PARTE 2° - sperimentazione f. Crati sbarramento di Tarsia – fitoplancton**
- 3.8 PARTE 3° - sperimentazione alghe coltivate – fitoplancton**
- 3.9 Indagini di laboratorio**
- 3.10 Esperimenti luce-fotosintesi (curve P/I)**

### 3.1 Inquadramento geografico dei siti di ricerca

La sperimentazione si svolge su due direttrici geografiche, una sul fiume Busento nel tratto che attraversa la città di Cosenza, l'altro sul fiume Crati presso lo sbarramento di Tarsia. In figura si riporta l'inquadramento geografico dei siti scelti per la sperimentazione.

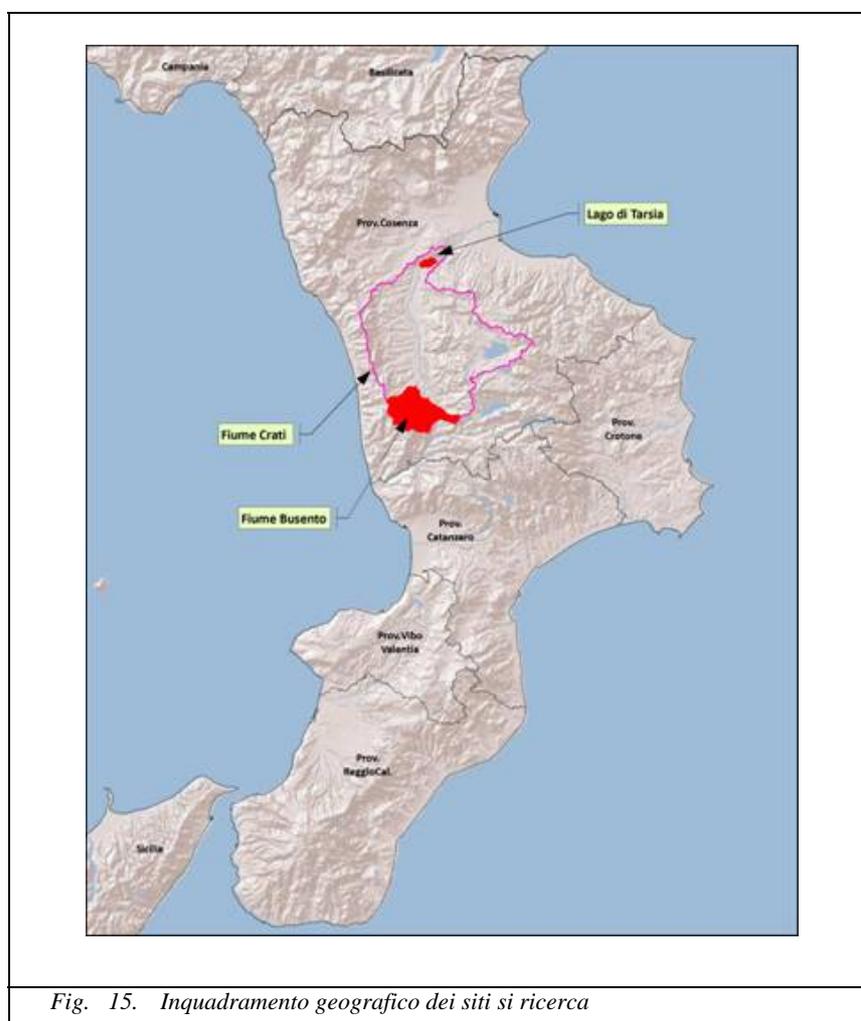


Fig. 15. Inquadramento geografico dei siti di ricerca

Sito di sperimentazione sul fiume Crati- sbarramento di Tarsia- fitoplancton.

Il fiume Crati è il fiume più importante della regione Calabria, sia del punto di vista ambientale che da quello idrologico. Nasce sull'altopiano silano in località Timpone Bruno, a 1740 m d'altitudine, ha una lunghezza dell'asta principale di circa 81 km, con un bacino imbrifero di più di 2.200 km<sup>2</sup>. Lungo il suo percorso, nei pressi di Tarsia, a causa di uno sbarramento artificiale, il Crati che crea un invaso.

Dopo lo sbarramento riprende il suo percorso, e dopo aver attraversato la Piana di Sibari, sfocia nel mare Ionio. Tra i maggiori affluenti si hanno: Busento, Mucone, Follone, Esaro e Coscile.



Fig. 16. Invaso artificiale di Tarsia



*Fig. 17. Scorcio fotografico dell'invaso di Tarsia*



*Fig. 18. Scorcio fotografico dell'invaso di Tarsia*

Sito di sperimentazione sul fiume Busento- alghe filamentose.

Il fiume Busento è tra i più importanti affluenti del fiume Crati.

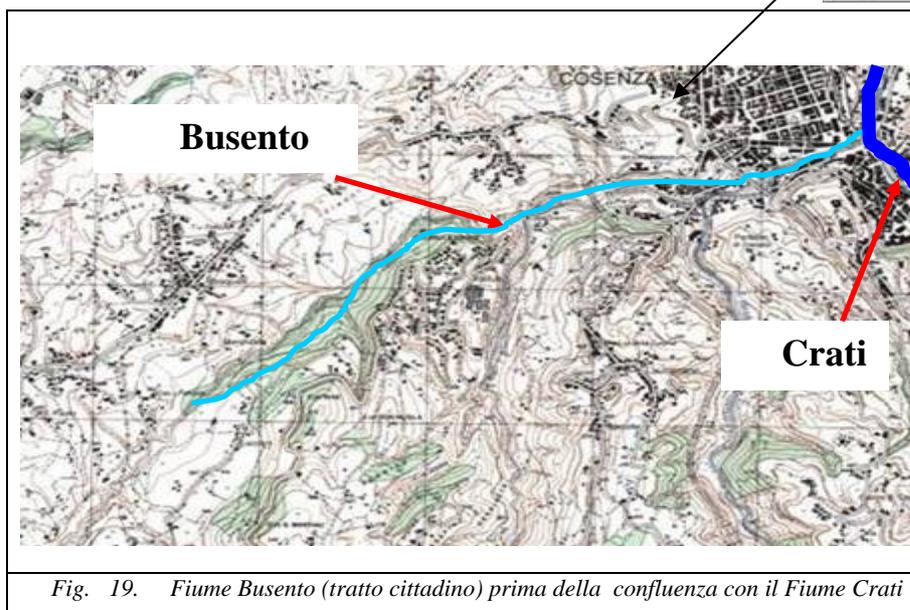


Fig. 19. Fiume Busento (tratto cittadino) prima della confluenza con il Fiume Crati



Fig. 20. Scorcio fotografico del Fiume Busento nel tratto cittadino

## 3.2 Sperimentazione

Lo scopo dello studio è quello di determinare il contributo alla riossigenazione naturale della zona eufotica dei corpi idrici dovuto all'attività fotosintetica.

Con il fine di dare una valutazione a tale componente della riossigenazione naturale, è stata approntata una campagna di sperimentazione per la determinazione della produzione di ossigeno fotosintetico da parte degli autotrofi acquatici, della zona eufotica.

La sperimentazione si svolge su tre direttrici, la prima sul Busento, la seconda sul fiume Crati (sbarramento di Tarsia) e la terza su alghe coltivate.

L'indagine svolta durante la ricerca, sugli autotrofi, è stata sviluppata inizialmente sulla produzione di ossigeno fotosintetico prodotto dalle alghe filamentose, ma si svolge principalmente sul contributo alla riossigenazione dovuto all'apporto di ossigeno fotosintetico dovuto al fitoplancton.

La sperimentazione, è quindi suddivisa in tre parti, 1° parte sulle alghe filamentose, svolta sul Fiume Busento; 2° parte sul fitoplancton campionamenti fatti nei pressi dello sbarramento sul Fiume Crati presso Tarsia; 3° parte su fitoplancton coltivato.

Per le misure di produzione di ossigeno degli autotrofi (alghe filamentose e fitoplancton), si è stato pensato e costruito un prototipo di strumento all'uso.

### 3.3 Campagne di campionamento e prove

Sono riportate di seguito le fasi di sperimentazione e di campionamento

<i>Indagine preliminare :</i>	2008	(date prove in allegato A)
<i>1° campionamento f.Busento:</i>	2008	(date prove in allegato B)
<i>2° campionamento f.Busento:</i>	2009	(date prove in allegato B)
<i>1° campionamento sbarramento di Tarsia – f.Crati::</i>	2009	(date prove in allegato C)
<i>2° campionamento sbarramento di Tarsia – f.Crati::</i>	2010	(date prove in allegato C)
<i>1° campionamento alghe coltivate:</i>	2009	(date prove in allegato D)
<i>2° campionamento alghe coltivate:</i>	2010	(date prove in allegato D)
<i>1° campionamento prove bianche:</i>	2009	(date prove in allegato E)

Tab. 11: Campagne di campionamento

Le date delle prove vengono riportate in allegato.

### 3.4 Costruzione di un prototipo di strumento all'uso della sperimentazione

Per realizzare le misure di produzione di ossigeno degli autotrofi, è stato realizzato un prototipo di strumento che permette la misura diretta della produzione dell'ossigeno da parte degli autotrofi, che ci si propone indagare. Esso permette di realizzare la misura dell'ossigeno prodotto dagli autotrofi nonché la respirazione notturna. Lo strumento consente di effettuare misure a diversi intervalli di tempo, con diversi tipi di alghe, ed in diverse condizioni ambientali. Può essere utilizzato sia in laboratorio che in ambiente esterno. Lo strumento è stato inoltre utilizzato per la misura del BOD<sub>5</sub>.

Lo strumento è costituito da un reattore in policarbonato di volume di circa 9 litri e diametro di 27 cm di forma sferica diviso in due calotte di cui quella superiore trasparente.

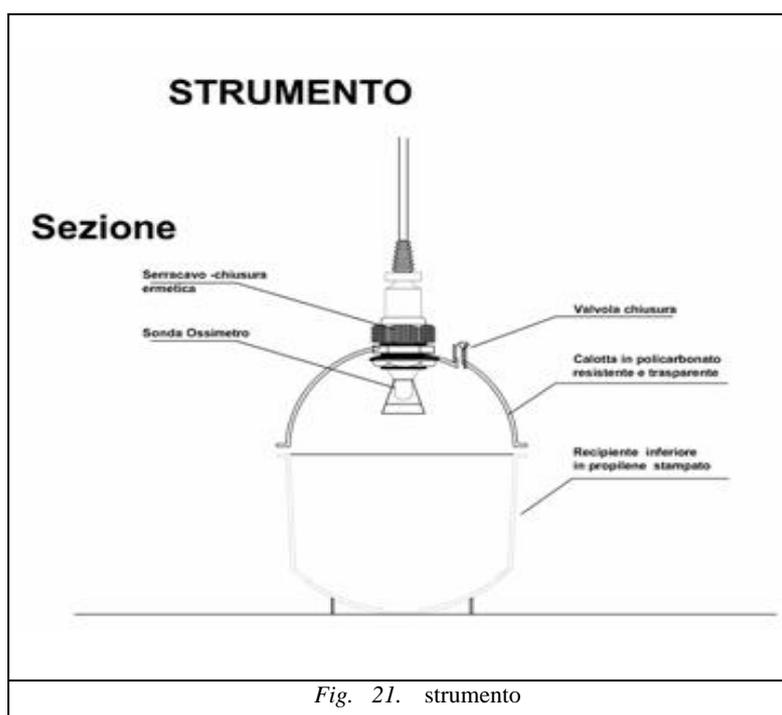
Il reattore è strumentato con:

- sonda LDO (Luminescent Dissolved Oxygen - Ossigeno Disciolto in Luminescenza);
- sonda di temperatura;
- agitatore magnetico a velocità regolabile in grado di fornire un gradiente di mescolamento al liquido del campione, per migliorare la libera manifestazione della fotosintesi e della respirazione.

L'intervallo di misura della sonda LDO è compreso tra 0,01 e 20,0 mg/l (ppm) e saturazione tra 0 % a 200%, l'accuratezza:  $\pm 0,1$  mg/l nell'intervallo tra 0 e 8 mg/l;  $\pm 0,2$  mg/l nell'intervallo tra 8 e 20 mg/l.

Il sensore di temperatura può lavorare tra 0 °C e 50°C.

Il reattore oltre alle misure respirazione/fotosintesi è stato utilizzato per le misure di BOD<sub>5</sub> accoppiato a frigotermostato dotato di sistema di termoregolazione.



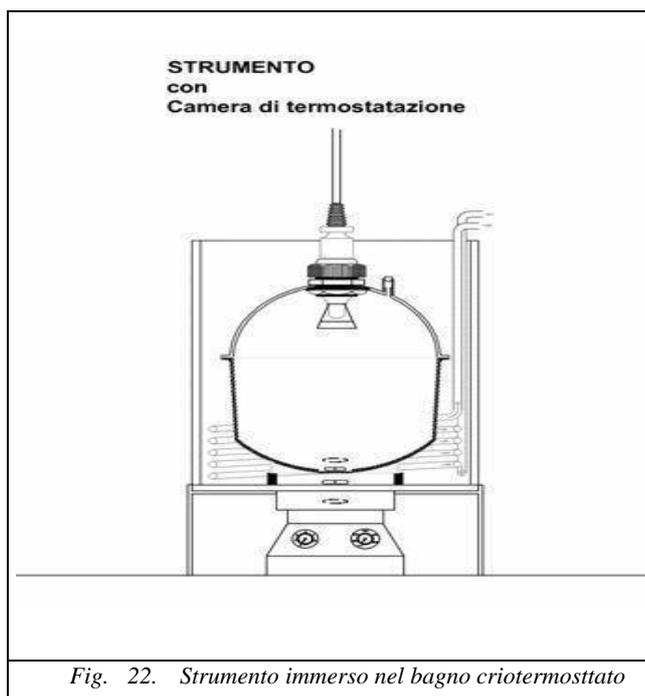
### 3.5 Costruzione di una camera di termostatazione

Per eliminare l'eventuale aumento di calore dovuto all'esposizione dello strumento alle radiazioni solari, si è pensato e realizzato un sistema di termostatazione.

Il sistema di termostatazione è realizzato per mezzo di un bagno, costituito da un cilindro in polipropilene trasparente del diametro di 0,38 m, nel quale è immerso il reattore.

Il bagno è criotermostato (-5 °C a 80 °C precisione max +/- 0,05°C di lettura +/- 0,1°C) con scambiatore di calore in rame; un agitatore a bolle crea un gradiente di velocità nel liquido del bagno favorendo la termostatazione.

Il bagno collegato ad un termocriostato attraverso un sistema di tubi, mantiene la temperatura, impostata, pressoché costante durante la durata delle prove.



Nell'immagine seguente è riportato lo strumento, costruito.



### 3.6 PARTE 1° - sperimentazione fiume Busento - alghe filamentose

#### 1° CAMPIONAMENTO: SETT-OTT 2008

##### *Preparazione della campagna di sperimentazione.*

Nel percorso cittadino del fiume Busento si è scelto un tratto di riferimento le cui caratteristiche idrauliche e del fondo alveo, fossero stabili per il periodo di sperimentazione (figura 24).



Fig. 24. Tratto scelto per la prima fase della sperimentazione con le alghe filamentose nel percorso cittadino del fiume Busento

Per indagare sulle alghe filamentose sono state realizzate delle *piastrelle di terracotta*, su cui le alghe potessero trovare un substrato di attecchimento e di crescita ed il cui peso potesse essere rilevato con la bilancia tecnica.

Si riporta una foto delle piastrelle prima di essere poste sul letto del fiume, Busento.



Fig. 25. Piastrelle in terracotta preparate per la sperimentazione con alghe filamentose

La posa delle piastrelle nel fiume è finalizzata ad indagare lo sviluppo delle alghe durante la stagione primaverile fino al tardo autunno.

Le piastrelle sono state classificate per peso ed area, prima di essere state ancorate ad un supporto di cemento tramite delle viti a pressione.

### **Raccolta dei campioni.**

Durante il periodo di crescita delle alghe sono stati effettuati dei sopralluoghi con frequenza settimanale. Si riportano in seguito delle immagini che possono dare una idea dello sviluppo della componente vegetazionale, sia ripariale che acquatica. Lo sviluppo massimo delle alghe si è verificato in agosto, quando si è deciso di prelevarle per effettuare le prove.

Nella immagine in figura 26 si mostra lo stato del corso d'acqua nel mese di aprile 2008, poco tempo prima della posa delle piastrelle.



Nella immagine successiva, in figura 27, si mostra lo stato del corso d'acqua nel mese di maggio 2008, poco tempo dopo la posa delle piastrelle.



Nella immagine di fig. 28 è riportata una piastrelle posata in acqua all'inizio della sperimentazione in cui si vede che ancora non sono attecchite le alghe filamentose.

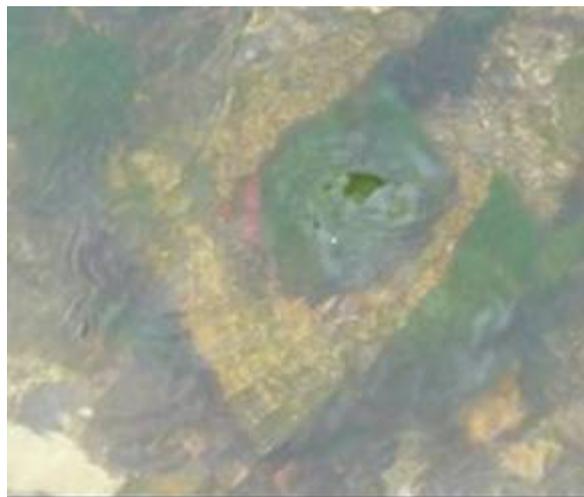


*Fig. 28. Piastrelle i terracotta posata in acqua, mese di maggio 2008, per la sperimentazione con alghe filamentose*

Nell'immagine in fig. 29 si mostra lo stato del corso d'acqua nel mese di luglio 2008, un quando lo sviluppo delle alghe filamentose hanno già raggiunto un buon grado di sviluppo sulle piastrelle posate nel fiume Busento.



*Fig. 29. Tratto di riferimento per la sperimentazione con alghe filamentose nel mese di luglio 2008*



*Fig. 30. Alghe filamentose attecchite sopra le piastrelle*

Nelle successive immagini si può notare lo sviluppo vegetazionale delle alghe filamentose sul letto del fiume prima di essere prelevate per gli esperimenti.



*Fig. 31. Sviluppo e copertura del letto del fiume da parte delle alghe filamentose*



*Fig. 32. Sviluppo e copertura del letto del fiume da parte delle alghe filamentose*

Al raggiungimento del massimo sviluppo vegetazionale, le alghe filamentose, insieme alle piastrelle, sono state raccolte, e portate in laboratorio, in contenitori di vetro al buio, per lo svolgimento della prova di produzione dell'ossigeno fotosintetico.



*Fig. 33. Piastrelle i terracotta con alghe filamentose appena prelevate dal fiume*



Fig. 34. Piastrelle in terracotta con alghe filamentose appena prelevate dal fiume

Ad ogni raccolta sono state rilevate, la temperatura, la concentrazione e la % di saturazione dell'ossigeno disciolto. Sono stati inoltre stati prelevati i campioni per le determinazioni di : conducibilità. Sono inoltre stati effettuati dei campionamenti di acqua, per le successive analisi di laboratorio.

#### **Preparazione della prova.**

Le prove sono state eseguite all'aperto ad azimut costante e senza ostacoli, (N 39°23'47,23; E 16°14'24,67). Sul sito dove sono state eseguite le prove, è presente una stazione meteorologica dotata di datalogger multicanale di acquisizione dati.

La sperimentazione è stata preceduta da prove in bianco con acqua distillata per la durata di 24 h, con cui si è verificato la costanza del contenuto d'ossigeno iniziale.

Al fine di prevenire la limitazione del carbonio, necessario ai processi fotosintetici, i campioni sono stati sottoposti a prova nel pomeriggio inoltrato in modo che le alghe presenti contribuissero (per respirazione) all'aumento della concentrazione di carbonio per il giorno successivo, oltre che adattarsi alla nuova situazione. Per ridurre l'eventuale influenza della sovrasaturazione sui processi fotosintetici (i campioni al momento del prelievo erano già in condizione di saturazione o sovrasaturazione), è stato dosato, nel

volume di prova, un deossigenante quale solfito sodico ( $Na_2SO_3$ ) unito a un catalizzatore quale cloruro di cobalto ( $CbCl_2$ ) in modo da avere un contenuto di ossigeno di circa 3 mg/l.

**Modalità e durata della prova.**

La misurazione della produzione di ossigeno avviene ad intervalli di 15 minuti. Le prove hanno avuto durate predefinite dalle condizioni di sovrasaturazione e affidabilità dello strumento (200%). In questa prima parte della sperimentazione i tassi di produzione ottenuti si riferiscono a misure effettuate in un intervallo di tempo che rappresenta soltanto una frazione dell'intera giornata.

**2° CAMPIONAMENTO: AGO-OTT 2009**

Nella seconda campagna di prove, è stato esteso il tratto delle sperimentazioni nel fiume Busento, giungendo alla confluenza con il fiume Crati, allo scopo di incrementare il numero di piastrelle posate sul fondo alveo.

**Modalità e durata della prova**

Il tempo delle prove è stato aumentato fino ad arrivare a prove di durata di 5 giorni.

### 3.7 PARTE 2° - sperimentazione f. Crati sbarramento di Tarsia – fitoplancton

#### **1° CAMPIONAMENTO: LUG -OTT 2009**

Per la sperimentazione con i campioni provenienti dal fiume Crati – sbarramento di Tarsia il metodo seguito è simile, alla procedura seguita nella 1° parte svolta con i campioni provenienti dal fiume Busento, cambiano solo i campioni, in questa parte si usano i campioni di fitoplancton.

#### **Raccolta dei campioni.**

Durante il periodo di crescita del fitoplancton sono stati effettuati dei sopralluoghi con frequenza settimanale e prelevati campioni. I campioni prelevati sono stati portati direttamente al laboratorio presso il quale sono state effettuate le prove.

#### **Preparazione della prova.**

Le prove sono state eseguite, sempre allo stesso modo.

#### **Modalità e durata della prova.**

La misurazione della produzione di ossigeno avviene ad intervalli di 15 minuti. Le prove hanno avuto durate predefinite dalle condizioni di sovrasaturazione e affidabilità dello strumento (200%). La durata delle prove per la misura dei tassi di produzione sono riferiti a intervalli di tempo che per alcune prove, superano l'intera giornata, coprendo un intervallo in alcuni casi di più giorni.

### 3.8 PARTE 3° - sperimentazione alghe coltivate – fitoplancton

#### 1° CAMPIONAMENTO: MAGG -NOV 2009

Per la sperimentazione con i campioni di alghe fitoplanctoniche coltivate, il metodo seguito è uguale a quello usato nella 2° parte di sperimentazione, svolta con i campioni provenienti dal fiume Crati sbarramento di Tarsia, cambiano i campioni in questa parte si usano i campioni di fitoplancton di alghe coltivate.

#### *Raccolta dei campioni.*

Alla stessa maniera della 2° parte di sperimentazione, durante il periodo di crescita del fitoplancton sono stati effettuati dei sopralluoghi con frequenza settimanale e prelevati campioni. I campioni prelevati sono stati portati direttamente al laboratorio presso il quale sono state effettuate le prove.

#### *Preparazione della prova.*

Le prove sono state eseguite, sempre allo stesso modo, già descritto.

#### *Modalità e durata della prova.*

La misurazione della produzione di ossigeno avviene, anche in questo caso, ad intervalli di 15 minuti. Le prove hanno avuto durate predefinite dalle condizioni di sovrasaturazione e affidabilità dello strumento (200%). La durata delle prove per la misura dei tassi di produzione sono riferiti a intervalli di tempo che per alcune prove, superano l'intera giornata, coprendo un intervallo in alcuni casi di più giorni.

### 3.9 Indagini di laboratorio

#### Parametri chimici

Presso il Laboratorio di Analisi del Ciclo degli Inquinanti del Dipartimento di Difesa del Suolo di Sant'Antonello di Montalto Uffugo, sono state effettuate analisi di: conducibilità, pH, OD, BOD<sub>5</sub> e COD, nonché composti azotati, i cloruri e fosforo.

#### Calcolo peso secco campioni

Allo scopo di poter normalizzare la produzione di ossigeno, per ogni prova è stato calcolato il peso secco dei campioni utilizzati.

- **Peso secco del fitoplancton (PS/unità di volume);** è stata effettuata una filtrazione, per gravità di 100 ml di ogni campione su filtri di porosità 45 µm. I filtri così preparati sono stati posti in stufa per 24 ore alla temperatura di 115°C, successivamente pesati con la bilancia analitica.

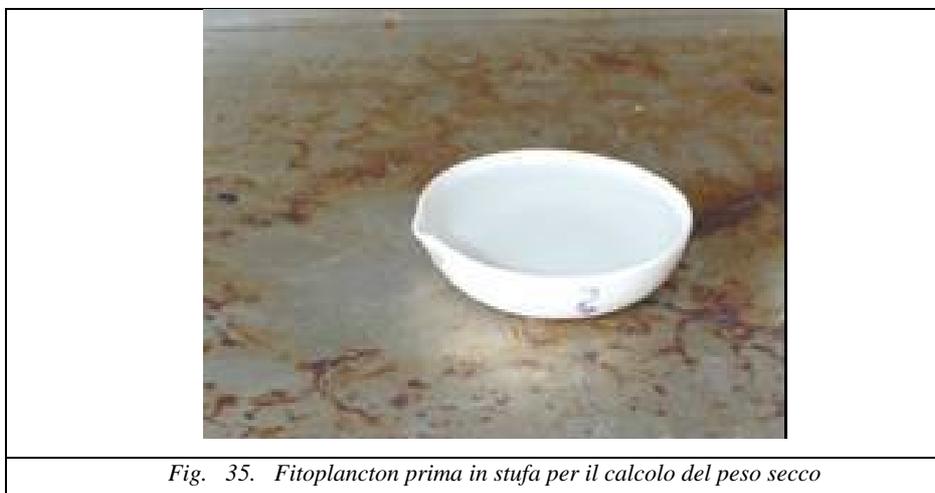


Fig. 35. Fitoplancton prima in stufa per il calcolo del peso secco

- **Peso secco delle alghe filamentose (PS/unità di superficie);** dopo aver condotto l'esperimento per la produzione dell'ossigeno, le alghe sono state poste in stufa per 24 ore alla temperatura di 115°C, successivamente pesate con la bilancia analitica.



Fig. 36. Piastrelle con alghe filamentose prima della prove



Fig. 37. Piastrelle alghe filamentose messe in stufa, per il calcolo del peso secco

### 3.10 Esperimenti luce-fotosintesi (curve P/I)

Gli esperimenti sono realizzati al fine di calcolare la produzione di ossigeno fotosintetico da parte degli autotrofi acquatici (fitoplancton, alghe filamentose) e di determinare i fattori che influiscono sulla produzione di ossigeno.

Questi parametri vengono stimati attraverso le curve luce-fotosintesi (curve P/I).

Gli esperimenti sono stati svolti in ambiente esterno ed eseguiti utilizzando lo strumento realizzato all'uopo della sperimentazione.

Prima della costruzione delle curve luce-fotosintesi si fanno delle verifiche sui dati. Dopo aver messo in relazione le misure di produzione dell'ossigeno fotosintetico, con il tempo (fotoperiodo), si effettua una verifica grafica su: andamento della produzione dell'ossigeno fotosintetico, andamento della temperatura, andamento della radiazione solare, della la prova. Ultimate le verifiche si decide se la prova è idonea ai fini della costruzione della curva luce-fotosintesi.

A questo punto si può procedere alla costruzione delle curve P/I.

Dal grafico luce-fotosintesi, si estraggono: il valore della produzione fotosintetica massima  $P_M$ , il valore cumulato giornaliero  $P_n$ , valore cumulato a mezzogiorno  $P_{h12}$ .

A questo punto si può calcolare il parametro  $\alpha$ , e il parametro  $I_s$ .

Una volta noti i dati della produzione di ossigeno fotosintetico e calcolati i parametri caratteristici della curva luce-fotosintesi si può fare, una modellazione della produzione dell'ossigeno fotosintetico con le formule in letteratura. Per poter comparare i dati sperimentali con i modelli scelti, si procede alla normalizzazione della produzione dell'ossigeno fotosintetico. Il valore di normalizzazione è misurato alle ore 12:00, PM (Produzione a Mezzogiorno).

Questa procedura è stata applicata a tutte le prove effettuate.

## **CAPITOLO 4. ANALISI DEI DATI**

### **Indice capitolo**

- 4.1 PARTE 3° - sperimentazione alghe coltivate – fitoplancton**
- 4.2 PARTE 2° - sperimentazione alghe coltivate – fitoplancton**
- 4.3 Indagini di laboratorio**
- 4.4 Esperimenti luce-fotosintesi (curve P/I)**
- 4.5 PARTE 1° - sperimentazione fiume Busento - alghe filamentose**

#### 4.1 PARTE 3° - sperimentazione alghe coltivate – fitoplancton

Analisi dei dati. Come già detto, prima di accettare una prova si fanno delle verifiche sui dati misurati di produzione di ossigeno fotosintetico.

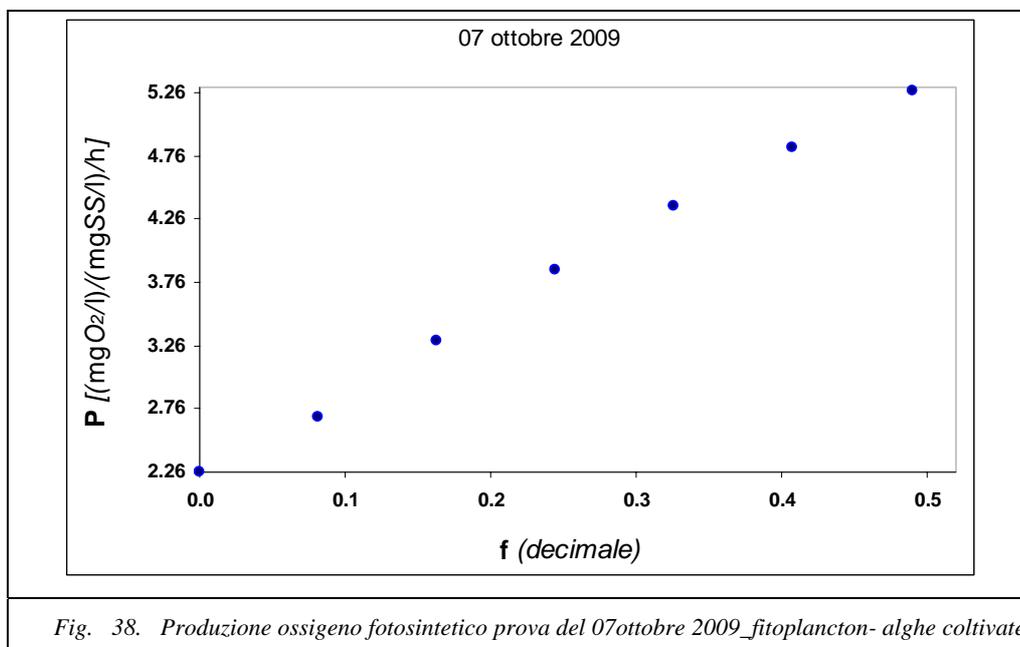
A titolo di esempio, si riporta di seguito, il procedimento seguito nell'analisi dei dati di una prova effettuata, che riproduce i passaggi necessari alla valutazione della produzione dell'ossigeno fotosintetico. Questa procedura è applicata ad ogni prova effettuata.

La prova scelta è quella del 07 ottobre 2009 alghe coltivate:

Steep 1: analisi grafica dell'andamento produzione di ossigeno fotosintetico.

L'operazione è finalizzata alla verifica del regolare sviluppo della produzione di ossigeno fotosintetico. È stata messa sull'asse delle ordinate la produzione di ossigeno fotosintetico misurata ad intervalli regolari di 15 minuti, in funzione dell'intero fotoperiodo.

Si ottiene un grafico di produzione cumulata, dal quale si può esaminare la regolarità della prova.



Se la prova ha avuto andamento regolare il grafico è continuo e crescente.

*Steep 2: analisi grafica dell'andamento della radiazione solare.*

Si mette in grafico la radiazione solare in funzione del tempo, intervallo di 15 minuti, dal grafico si può analizzare se la radiazione ha avuto un decorso regolare o meno. Un fattore di disturbo è sicuramente la nuvolosità. Nel caso, infatti, ci sia stata la presenza di nuvole la radiazione solare ha un andamento non armonico, cioè non assume la caratteristica forma a onda semisinusoidale, ed evidenzia dei salti nella rappresentazione grafica. L'ombreggiamento causato dalla presenza di nuvolole, ha influenza nella regolarità della produzione di ossigeno fotosintetico.

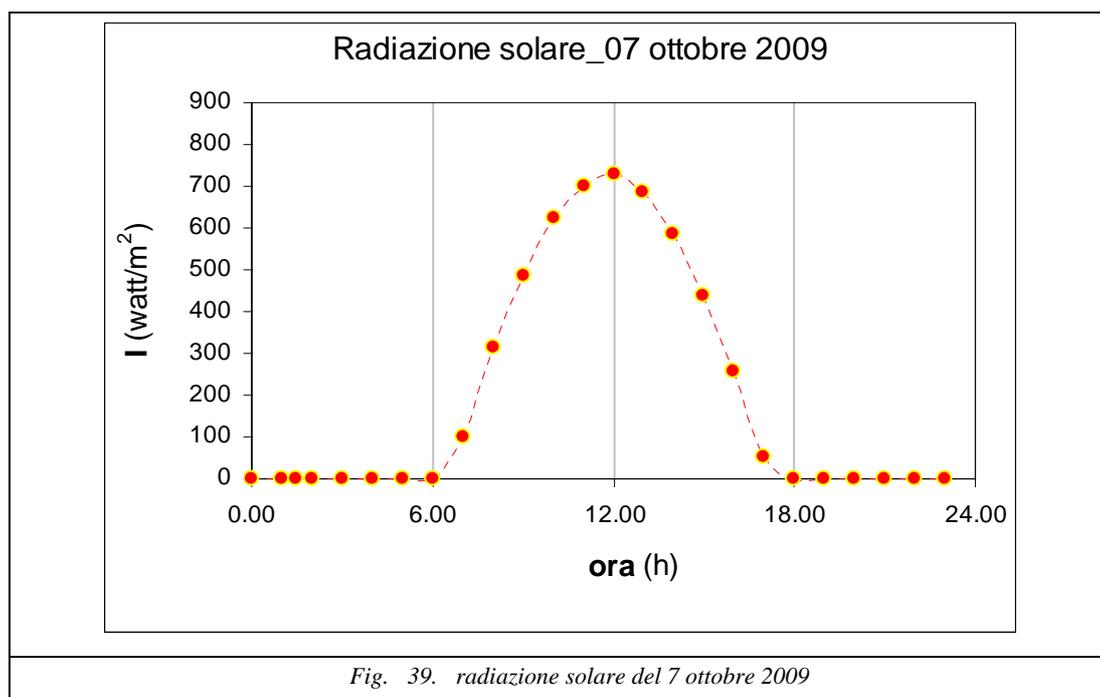
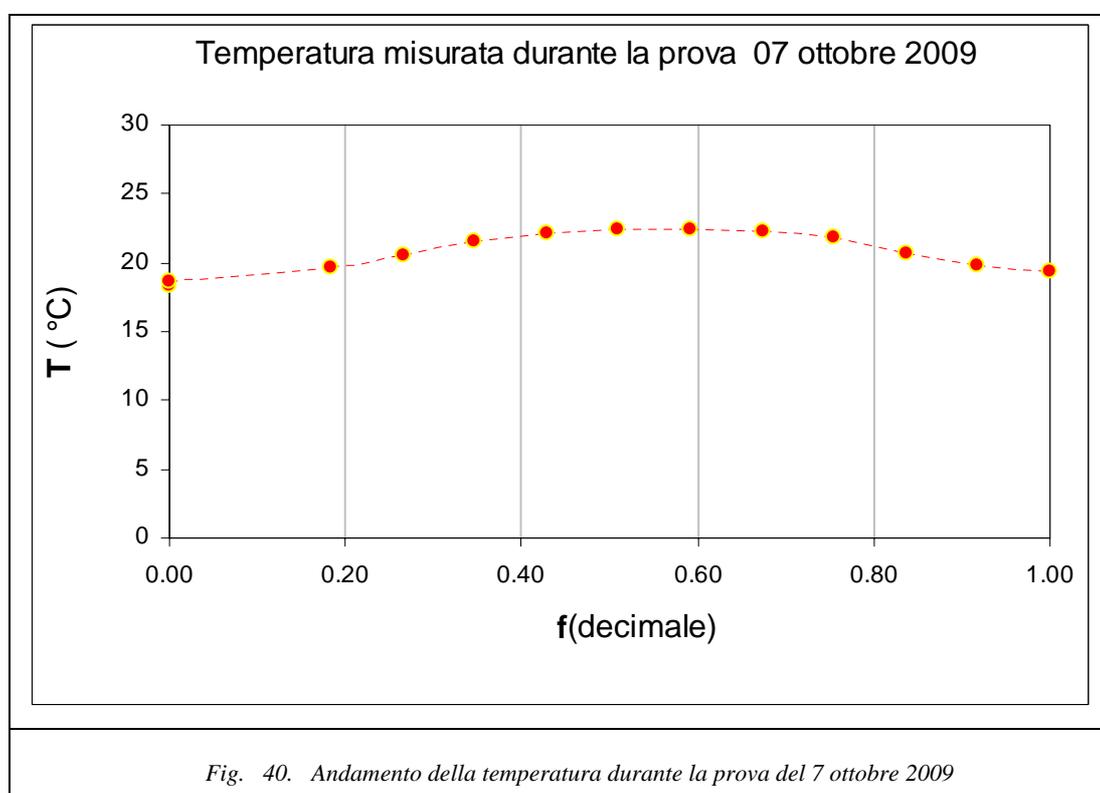


Fig. 39. radiazione solare del 7 ottobre 2009

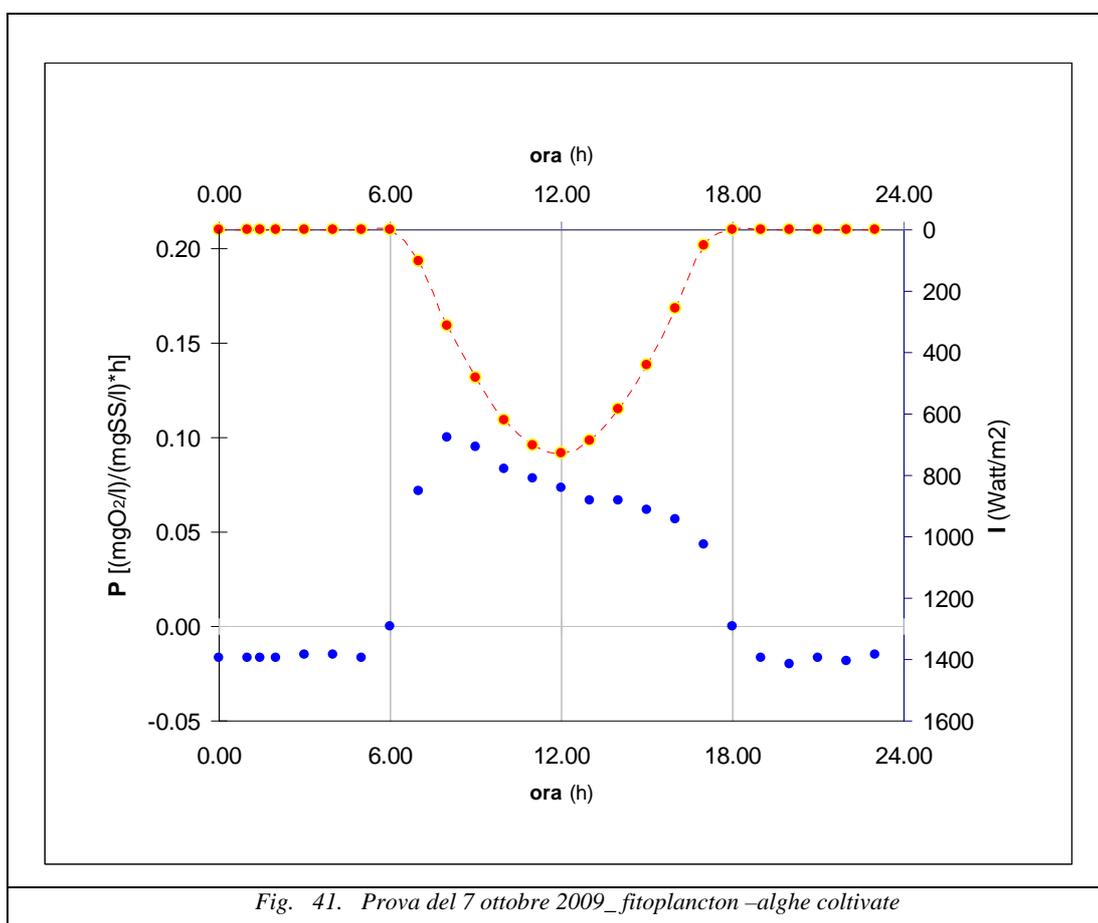
*Steep 3: analisi grafica dell'andamento della temperatura.*

La temperatura viene tracciata graficamente con lo stesso procedimento in funzione del tempo, ad intervalli regolari di un ora, da questo tipo di grafico si nota se la temperatura è stata disturbata o meno e da qualche fattore esterno, che abbia potuto compromettere la criotermostatazione.



Steep 4: analisi grafica comparativa dell'andamento della produzione e della radiazione.

Il risultato finale di tutte le verifiche grafiche fatte può essere riassunto in un grafico, nel quale l'ossigeno fotosintetico prodotto e l'andamento della radiazione solare sono messi in funzione del tempo, ad intervalli 1 ora, per l'intero sviluppo della giornata. Dall'esame di questo grafico si scarta o meno la prova, ai fini del prosieguo delle elaborazioni. Infatti da questa rappresentazione grafica si evidenzia se la prova è stata disturbata da qualche altro agente esterno, oltre che dalla nuvolosità o dalla temperatura come già detto.



Una volta stabilito che la prova non è stata disturbata, si passa ad analizzare la produzione di ossigeno fotosintetico, ed a comporre la curva luce-fotosintesi P/I, per ricavarne tutti i parametri.

Si compone il grafico P/I, della prova, mettendo in relazione la produzione di ossigeno fotosintetico, misurato ad intervalli di un ora, con la radiazione solare.

Attraverso la retta, che passa tra i due punti in cui si verifica la massima velocità di produzione dell'ossigeno fotosintetico, si può quantificare il parametro  $\alpha$ .

Dallo stesso grafico si ricava: il valore di produzione  $P_{h12}$  (produzione cumulata a mezzogiorno), il valore totale giornaliero  $P_n$ , (produzione netta).

I dati analizzati delle prove utili, sono riportati in tabella.

Data prova	$f$	$P_n$	$\alpha$	$I_s$
11-giu-09	0.646	0.430	0.00030	76
11-set-09	0.542	0.865	0.00060	125
7-ott-09	0.510	0.962	0.00090	102
30-ott-09	0.458	2.268	0.00210	107
20-nov-09	0.427	2.033	0.00250	103
<b>media</b>	<b>0.52</b>	<b>1.312</b>	<b>0.0013</b>	<b>102</b>
<i>min</i>	0.43	0.430	0.0003	76
<i>max</i>	0.65	2.268	0.0025	125
<i>dev standard</i>	0.08	0.796	0.0010	17
<i>f = fotoperiodo (decimali)</i>				
<i>P<sub>n</sub> = produzione netta ossigeno fotosintetico [(mgO<sub>2</sub>/l) / (mgSS/l) / (d)]</i>				
<i>α = pendenza iniziale della curva della produzione di ossigeno [(mgO<sub>2</sub>/l) / (mgSS/l) / (h)] / [watt/m<sup>2</sup>]</i>				
<i>I<sub>s</sub> = radiazione saturante [watt/m<sup>2</sup>]</i>				

Tab. 12: Prove sperimentali utili 2009 alghe fitoplanctoniche coltivate

Data prova	$f$	$P_{h12}$	$P_{mas}$
11-giu-09	0.646	0.021	0.029
11-set-09	0.542	0.073	0.107
7-ott-09	0.510	0.073	0.186
30-ott-09	0.458	0.186	0.186
20-nov-09	0.427	0.136	0.327
<b>media</b>	<b>0.56</b>	<b>0.098</b>	<b>0.150</b>
<i>min</i>	0.43	0.021	0.029
<i>max</i>	0.65	0.186	0.327
<i>dev standard</i>	0.08	0.064	0.114
<i>f = fotoperiodo (decimali)</i>			
<i>P<sub>h12</sub> = produzione di ossigeno fotosintetico misurato alle ore 12:00 [(mgO<sub>2</sub>/l)/(mgSS/l)/(h)]</i>			
<i>P<sub>mas</sub> = produzione massima oraria misurata [(mgO<sub>2</sub>/l)/(mgSS/l)/(h)]</i>			
<i>α = pendenza iniziale della curva della produzione di ossigeno [(mgO<sub>2</sub>/l)/(mgSS/l)/(h)]/[watt/m<sup>2</sup>]</i>			

Tab. 13: Prove sperimentali utili 2009 alghe fitoplanctoniche coltivate

## 4.2 PARTE 2° - sperimentazione f. Crati sbarramento di Tarsia – fitoplancton

Per le prove svolte con il fitoplancton prelevato dal fiume Crati sbarramento di Tarsia, si procede alla stessa maniera.

I dati analizzati, di tutte le prove non disturbate, svolte con il fitoplancton prelevato dal fiume Crati sbarramento di Tarsia sono riportati in tabella.

Data prova	$f$	$P_n$	$\alpha$	$I_S$
14-lug-09	0.635	0.146	0.00010	84
23-lug-09	0.625	0.305	0.00020	152
28-lug-09	0.615	0.220	0.00020	103
30-lug-09	0.615	0.103	0.00010	91
15-set-09	0.542	0.790	0.00070	141
<b>media</b>	<b>0.61</b>	0.313	0.0003	114
<i>min</i>	0.54	0.103	0.0001	84
<i>max</i>	0.64	0.790	0.0007	152
<i>dev standard</i>	0.04	0.28	0.0003	114
<i>f = fotoperiodo (decimali)</i>				
<i>P<sub>n</sub> = produzione netta ossigeno fotosintetico [(mgO<sub>2</sub>/l) / (mgSS/l) / (d)]</i>				
<i>α = pendenza iniziale della curva della produzione di ossigeno [(mgO<sub>2</sub>/l) / (mgSS/l) / (h)] / [watt/m<sup>2</sup>]</i>				
<i>I<sub>S</sub> = radiazione saturante [watt/m<sup>2</sup>]</i>				

Tab. 14: Prove sperimentali utili 2009- alghe fitoplanctoniche fiume Crati sbarramento di Tarsia

Data prova	$f$	$P_{h12}$	$P_{mas}$
14-lug-09	0.635	0.011	0.015
23-lug-09	0.625	0.014	0.015
28-lug-09	0.615	0.011	0.019
30-lug-09	0.615	0.007	0.014
15-set-09	0.542	0.068	0.100
media	0.561	<b>0.02</b>	<b>0.03</b>
min	0.427	0.01	0.01
max	0.646	0.07	0.10
dev standard	0.078	0.03	0.04

$f$  = fotoperiodo (decimale)  
 $P_{h12}$  = produzione di ossigeno fotosintetico misurato alle ore 12:00 [(mgO<sub>2</sub>/l)/(mgSS/l)/(h)]  
 $P_{mas}$  = produzione massima oraria misurata [(mgO<sub>2</sub>/l)/(mgSS/l)/(h)]  
 $\alpha$  = pendenza iniziale della curva della produzione di ossigeno [(mgO<sub>2</sub>/l)/(mgSS/l)/(h)]/[watt/m<sup>2</sup>]

Tab. 15: Prove sperimentali utili 2009- alghe fitoplanctoniche fiume Crati sbarramento di Tarsia

Mettendo la produzione netta  $P_n$ , in relazione del fotoperiodo si evidenzia che essa aumenta al diminuire dello stesso, tale andamento è riportato in grafico ,figura 42

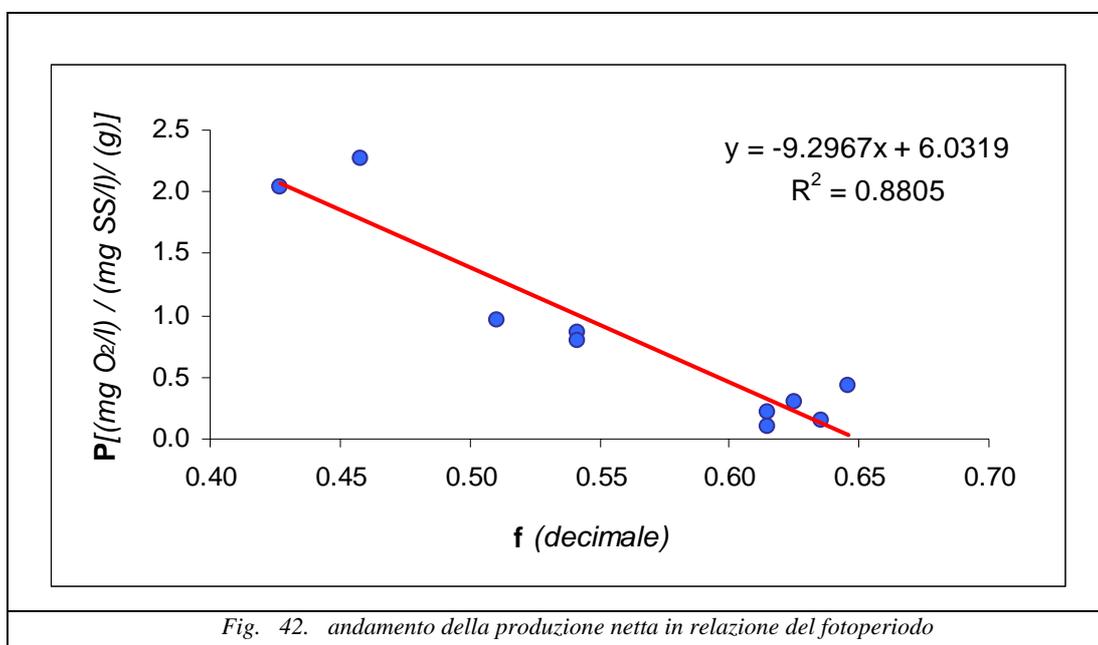


Fig. 42. andamento della produzione netta in relazione del fotoperiodo

### 4.3 Indagini di laboratorio

Si riportano le analisi di laboratorio effettuate sui campioni, delle prove utili.

	<i>pH</i>	<i>Cond</i>	<i>Cl</i>	<i>P-PO<sub>4</sub></i>	<i>N-NH<sub>4</sub></i>	<i>N-NO<sub>3</sub></i>	<i>S-SO<sub>4</sub></i>	<i>P/N</i>
data		$\mu\text{S/cm}$	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	
11-giu-09	7.98	578.0	12.2095	0.02532	0.0339	0.0193	26.388	0.476
11-set-09	8.46	697.0	26.2973	0.0492	0.2551	0.2574	25.852	0.096
7-ott-09	8.64	514.0	21.6014	0.05282	0.0344	0.0325	7.166	0.790
30-ott-09	8.41	340.4	40.0473	0.04775	0.0501	0.0537	12.993	0.460
20-nov-09	8.15	380.1	14.8446	0.09334	0.0735	0.0854	9.443	0.587
<i>media</i>	<b>8.328</b>	<b>501.900</b>	<b>23.000</b>	<b>0.054</b>	<b>0.089</b>	<b>0.090</b>	<b>16.368</b>	<b>0.482</b>
<i>dev standard</i>	0.262	145.704	11.027	0.025	0.094	0.097	9.143	0.253
<i>min</i>	7.980	340.400	12.210	0.025	0.034	0.019	7.166	0.096
<i>max</i>	8.640	697.000	40.047	0.093	0.255	0.257	26.388	0.790

Tab. 16: Analisi di laboratorio prove utili 2009- alghe fitoplanctoniche coltivate

	<i>pH</i>	<i>Cond</i>	<i>Cl</i>	<i>P-PO<sub>4</sub></i>	<i>N-NH<sub>4</sub></i>	<i>N-NO<sub>3</sub></i>	<i>S-SO<sub>4</sub></i>	<i>P/N</i>
		$\mu\text{S/cm}$	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	
14-lug-09	8.23	328.5	19.1689	0.03979	0.0215	0.514	7.434	0.074
23-lug-09	8.12	339.4	18.4932	0.04558	0.0248	0.4796	7.501	0.090
28-lug-09	7.98	333.5	29.6419	0.02315	0.301	0.2151	4.688	0.045
30-lug-09	7.70	332.0	29.2365	0.06367	0.4062	0.1198	0.67	0.121
15-set-09	8.88	343.0	28.6284	0.03328	0.0597	0.641	15.94	0.047
<i>media</i>	<b>8.182</b>	<b>335.280</b>	<b>25.034</b>	<b>0.041</b>	<b>0.163</b>	<b>0.394</b>	<b>7.247</b>	<b>0.076</b>
<i>dev standard</i>	0.438	5.841	5.679	0.015	0.179	0.218	5.601	0.032
<i>min</i>	7.700	328.500	18.493	0.023	0.022	0.120	0.670	0.045
<i>max</i>	8.880	343.000	29.642	0.064	0.406	0.641	15.940	0.121

Tab. 17: Analisi di laboratorio prove utili 2009- alghe fitoplanctoniche fiume Crati sbarramento di Tarsia

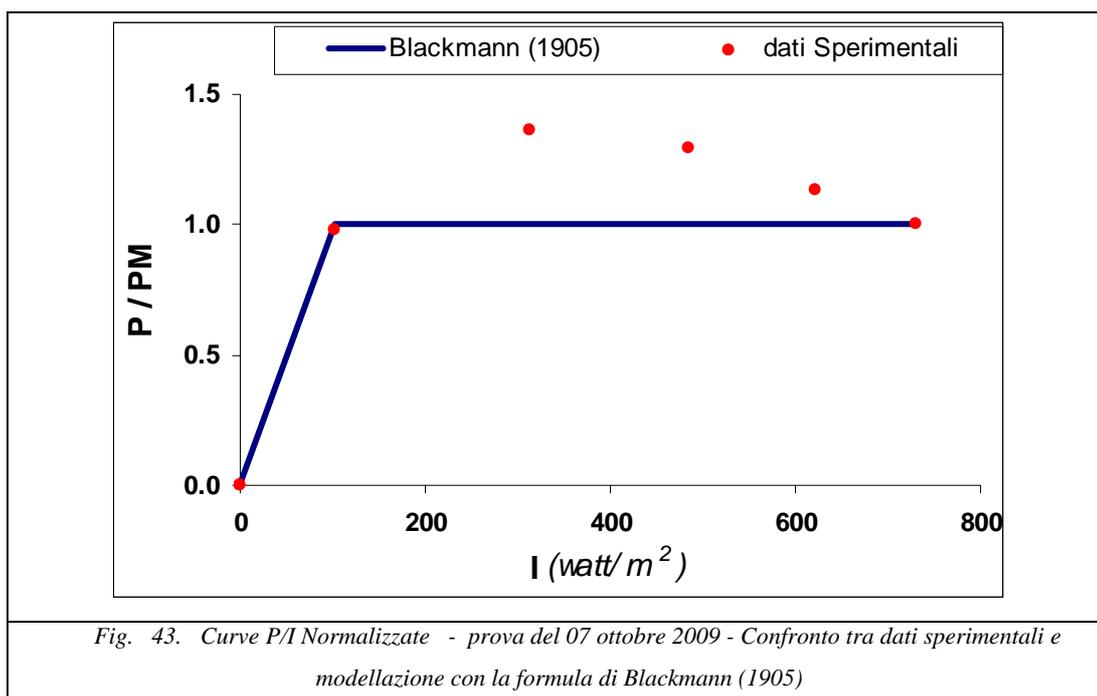
#### 4.4 Esperimenti luce-fotosintesi (curve P/I)

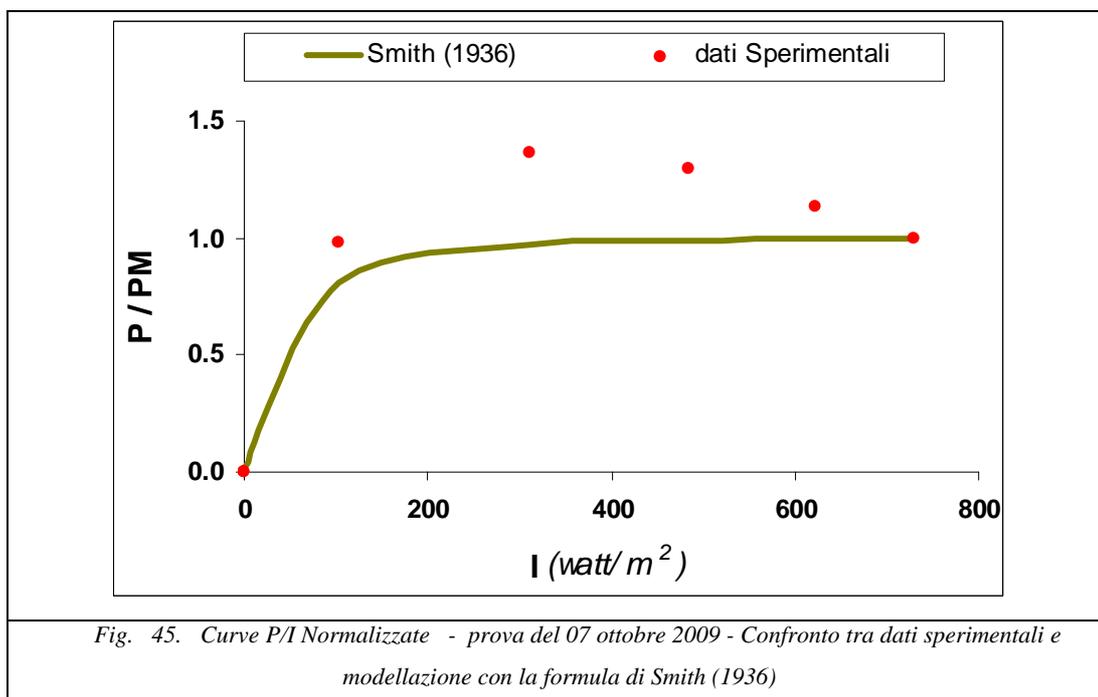
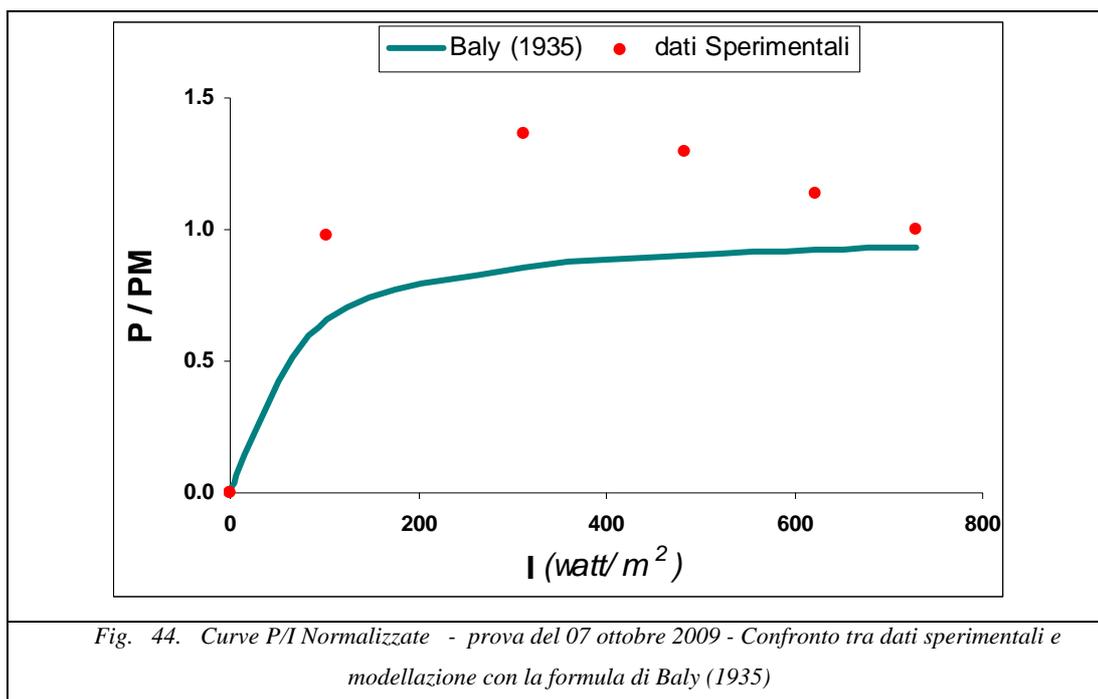
##### Modellazione della produzione dell'ossigeno fotosintetico con le formule in letteratura

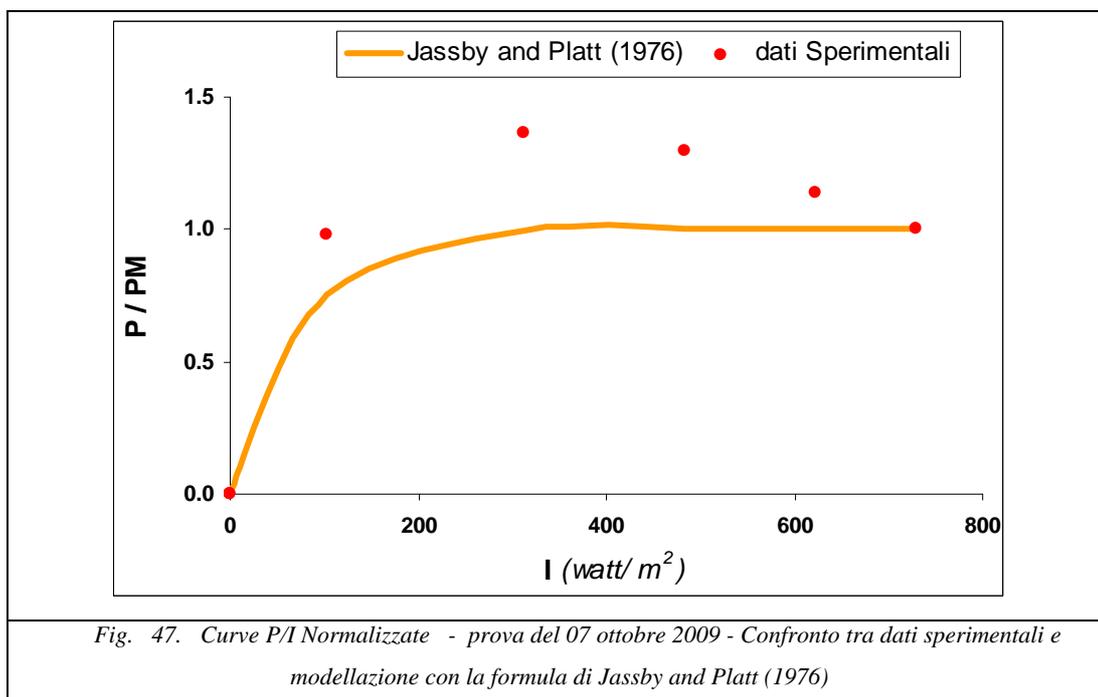
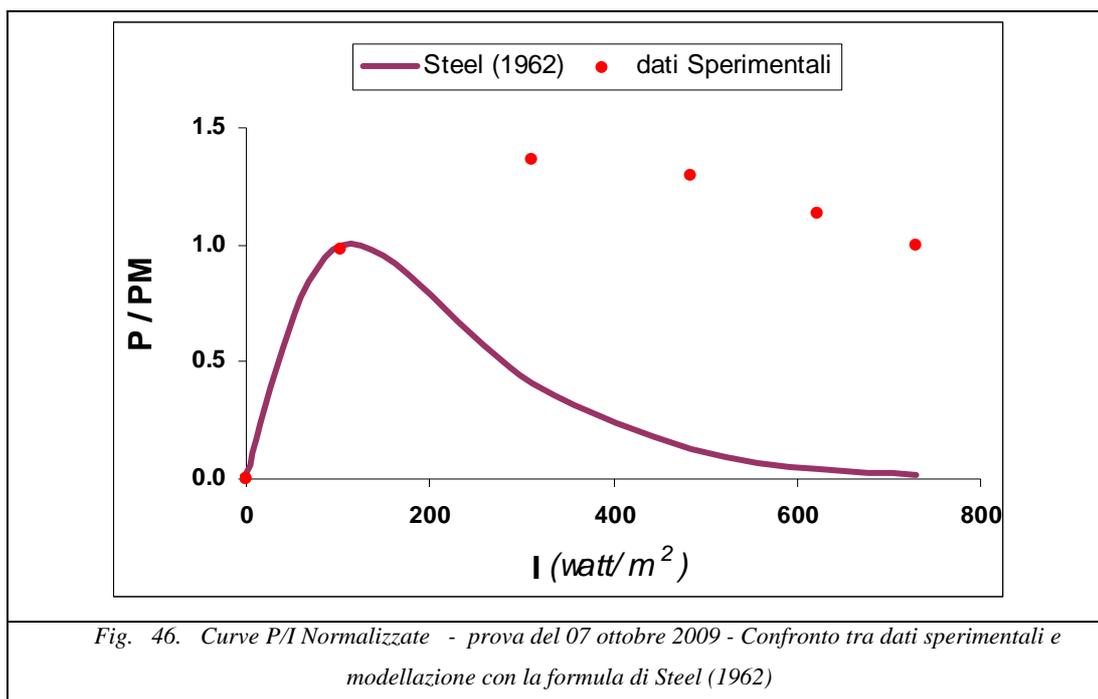
Noto il parametro  $\alpha$  della prova ed il valore di produzione  $PM$  (produzione di ossigeno fotosintetico a mezzogiorno), si procede al confronto dei dati sperimentali con i modelli in letteratura. Per effettuare il confronto si opera una normalizzazione dei dati.

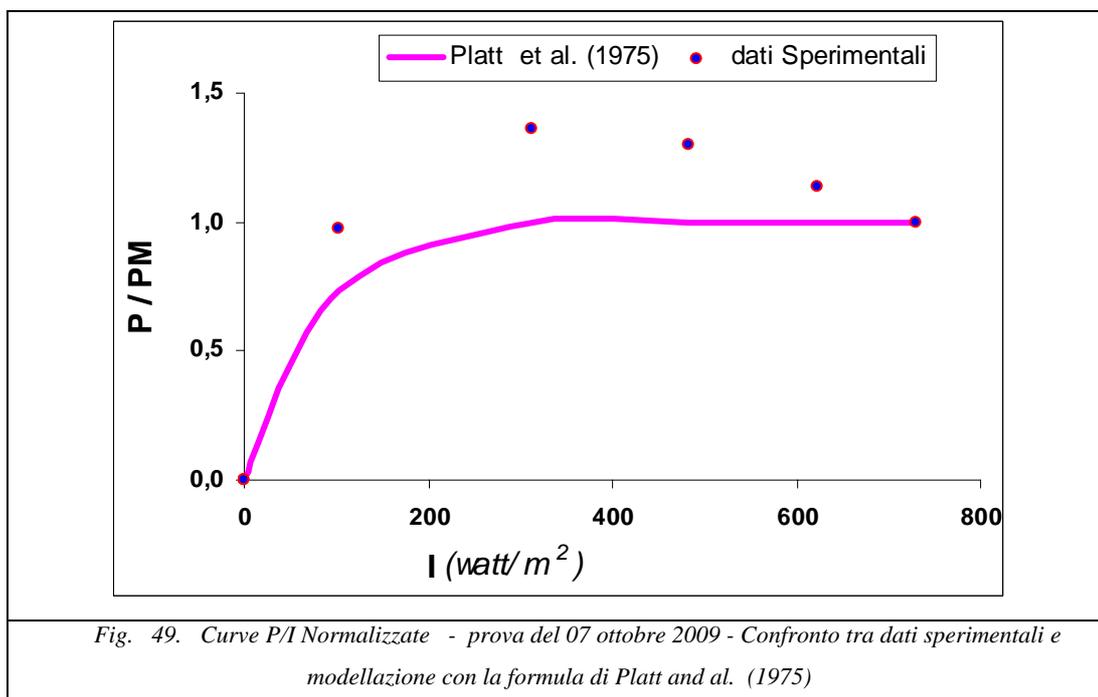
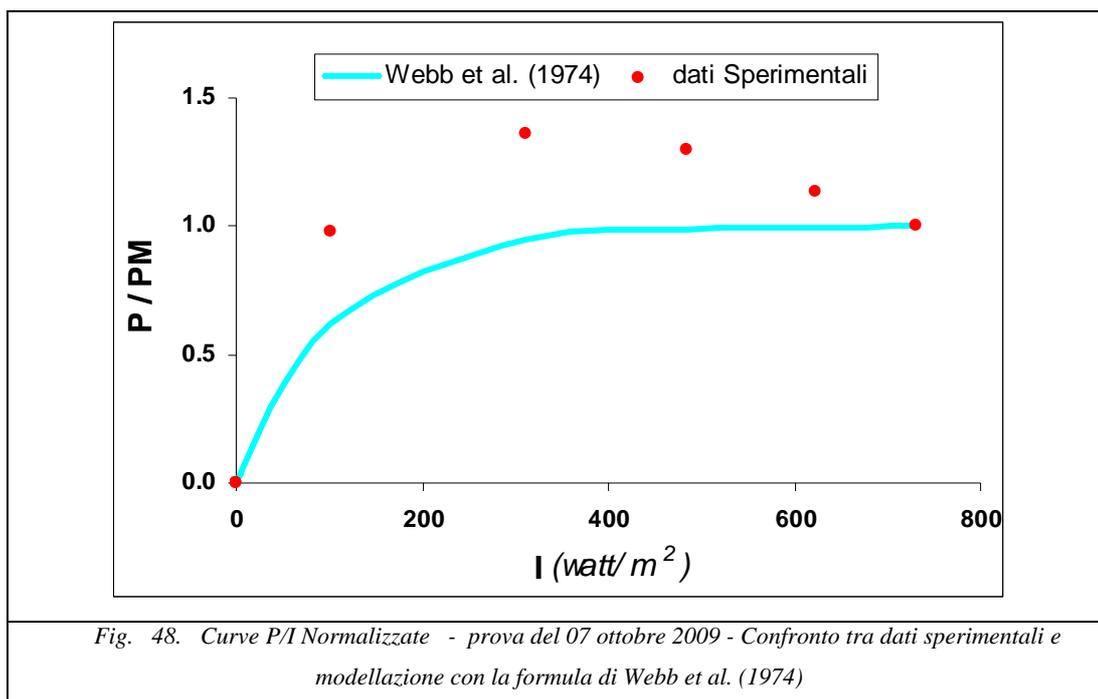
A titolo di esempio, in seguito, si riporta la prova del 07 ottobre 2009 effettuata con le alghe fitoplanctoniche coltivate, in cui si chiarisce il metodo usato.

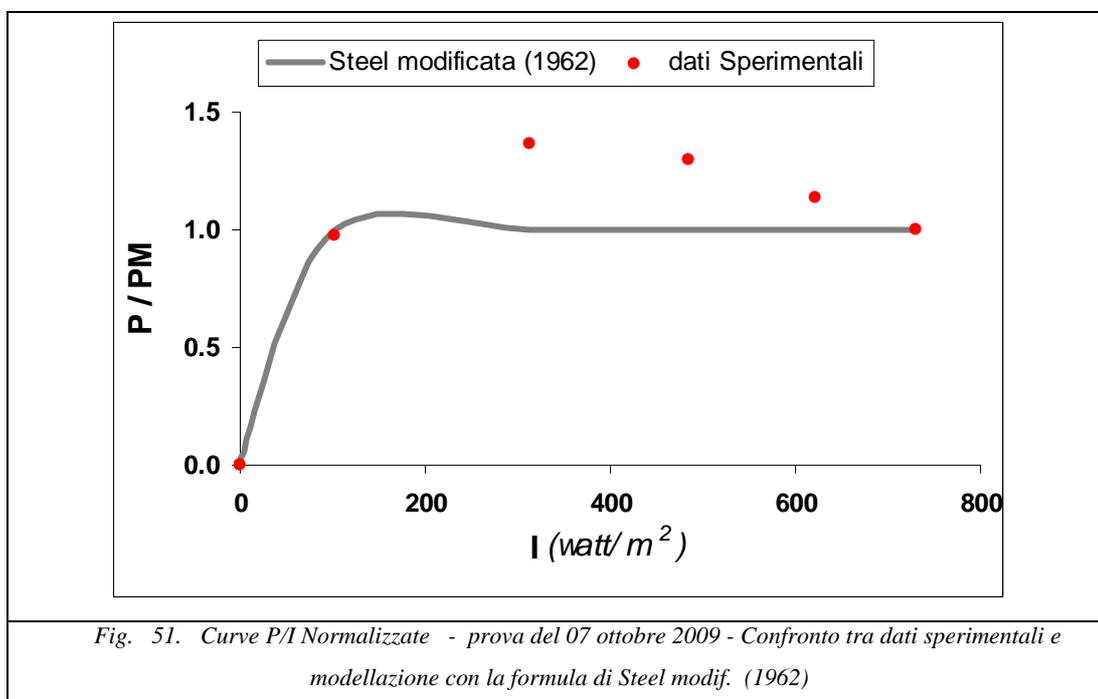
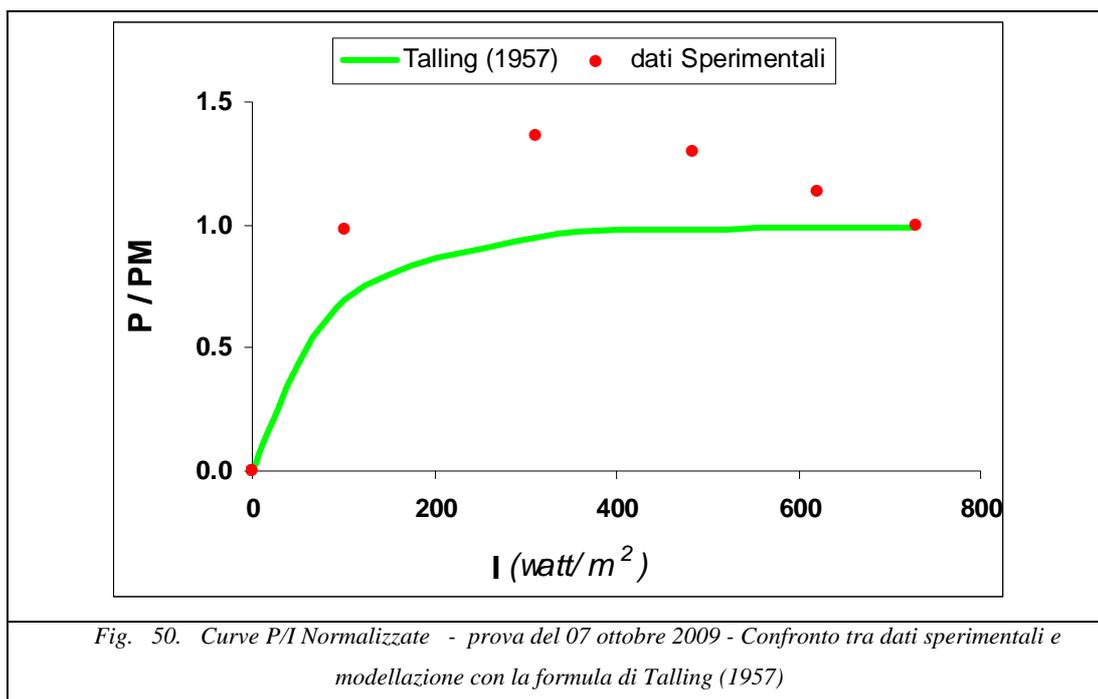
Per ogni formula modellata si riporta il grafico del modello simulato insieme ai dati sperimentali.

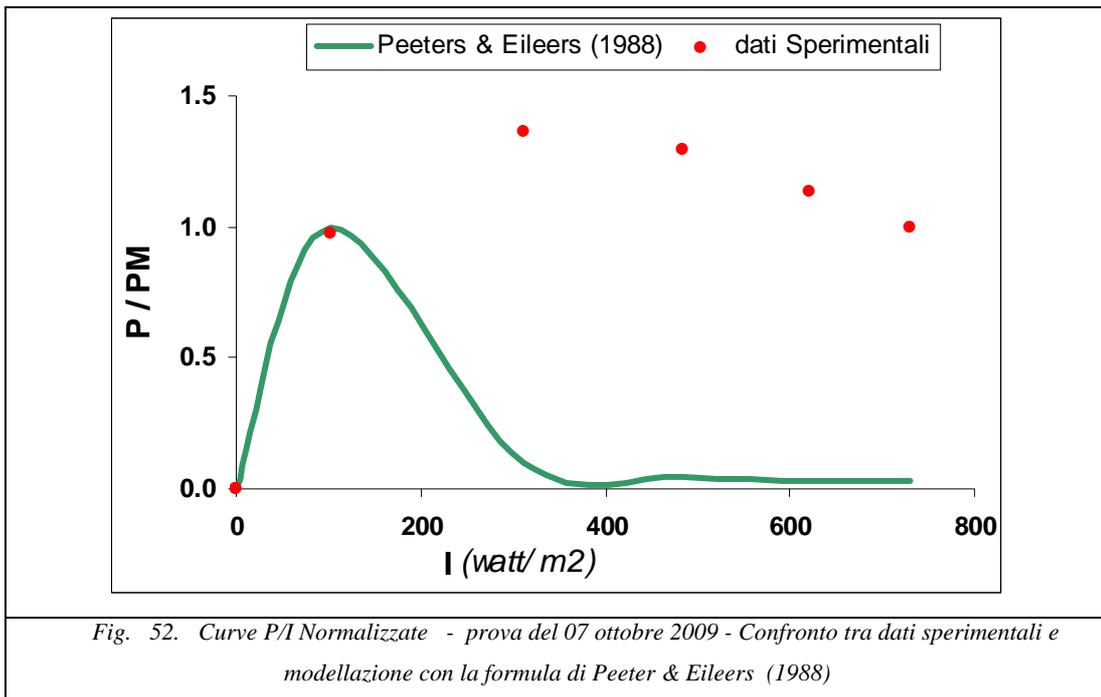




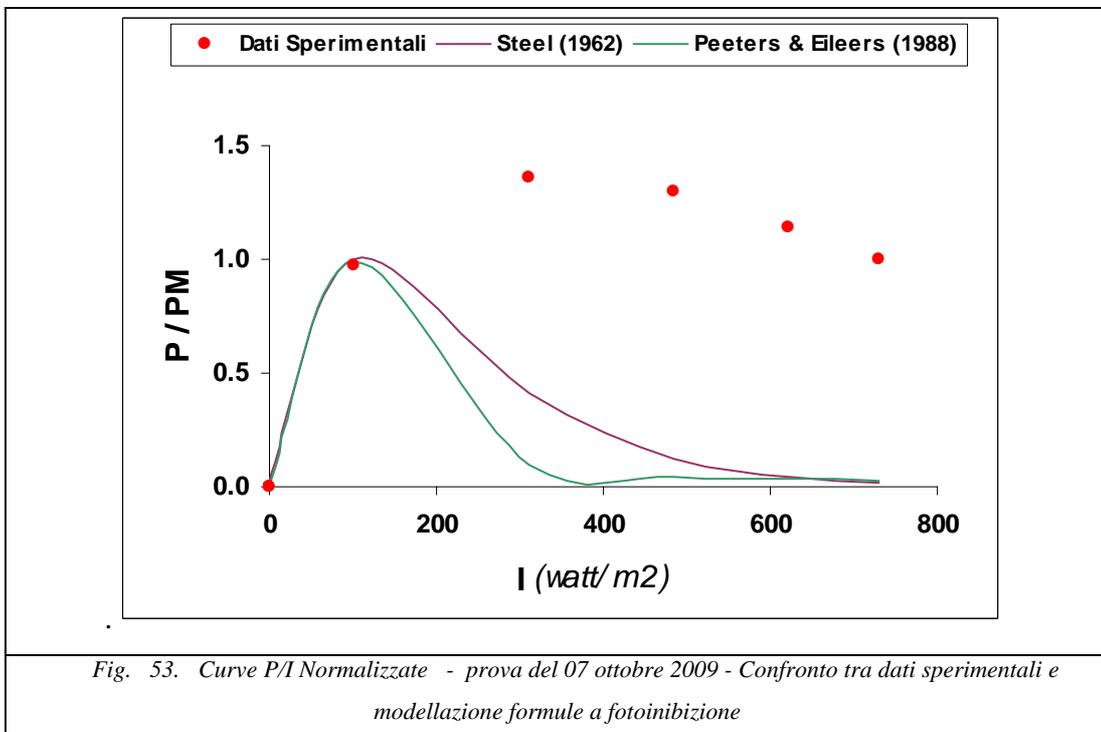


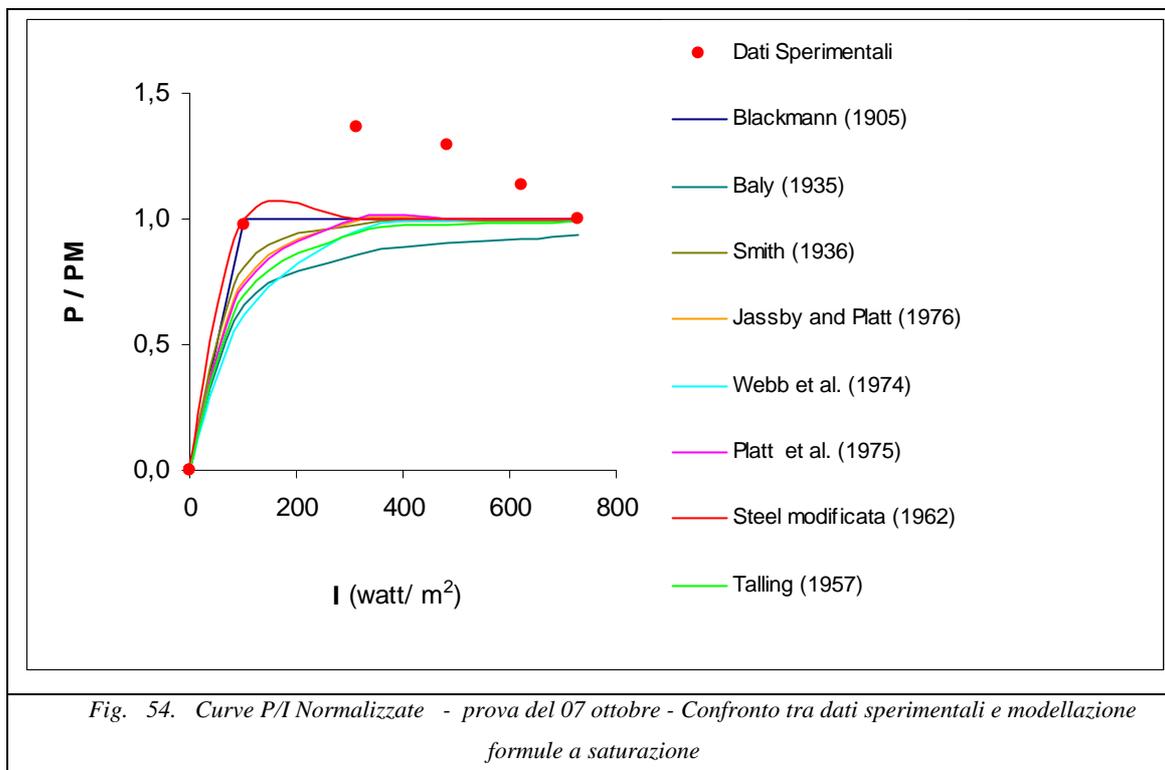






Nei due grafici che seguono sono riportate le formule a saturazione e a fotoinibizione





Per ogni prova utile, dopo aver normalizzato, i valori di produzione dell'ossigeno fotosintetico, con la produzione oraria misurata a mezzogiorno PM, ed eseguito le modellazioni delle formule in letteratura, si procede all'analisi di sensibilità.

Si esegue una prima analisi di sensibilità sulla produzione cumulata alle ore 12:00, in seguito anche sulla produzione cumulata dell'intera giornata.

## PRIMA ANALISI DI SENSIBILITA'

*Analisi dati : (Modello Blackmann (1905))*

*produzione cumulata alle ore 12:00*

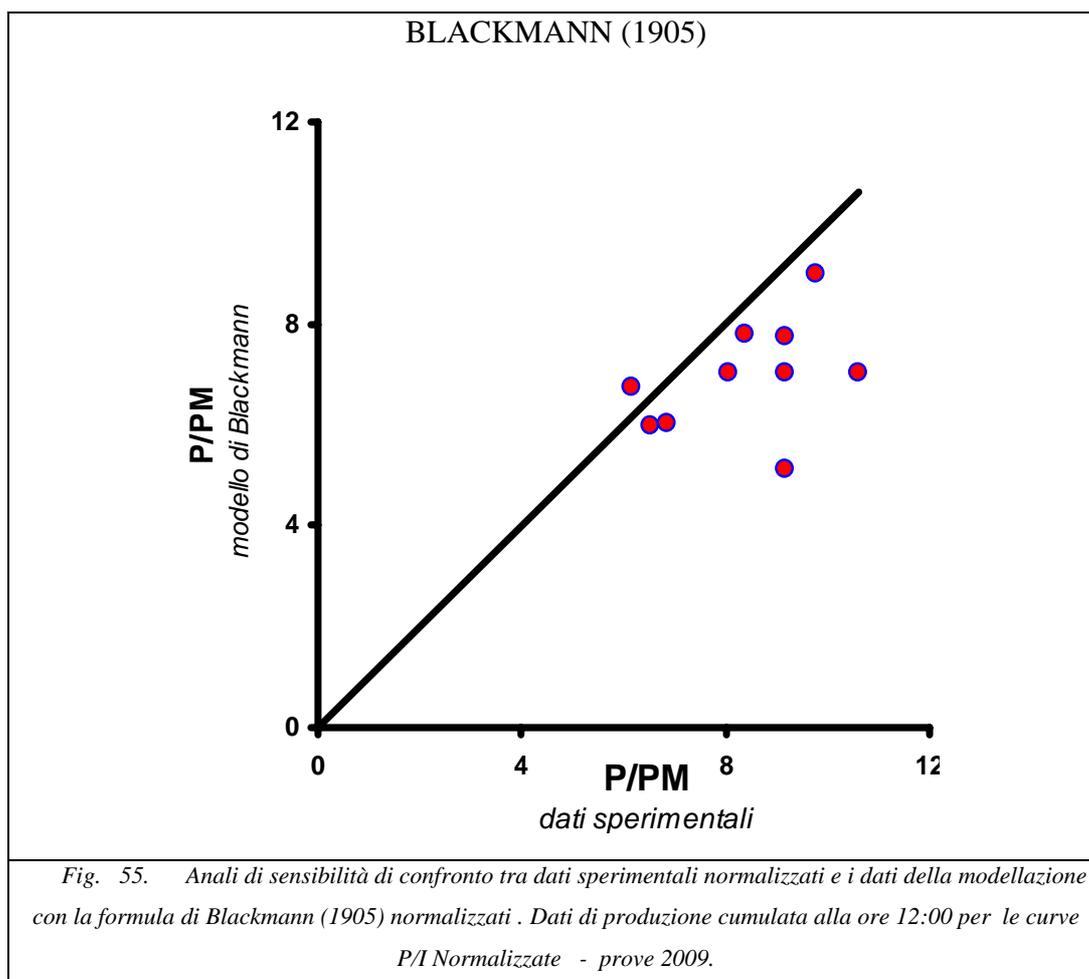
La tabella riporta i dati della simulazione dell'ossigeno disciolto prodotto dalla componente autotrofa, con la formula di Blackmann, per tutte le prove utili.

<b>Dati normalizzati modello di Blackmann (1905)</b>	
<i>data</i>	<i>P/PM</i>
11-giu	7.77
14-lug	7.75
23-lug	6.76
28-lug	7.03
30-lug	7.03
11-set	7.03
15-set	9.00
7-ott	6.01
1-nov	5.99
20-nov	5.13
<i>media</i>	<b>6.95</b>
<i>min</i>	5.13
<i>max</i>	9.00
<i>dev standard</i>	1.09

Tab. 18: Prove utili – formula di Blackmann (1905) dati simulati normalizzati

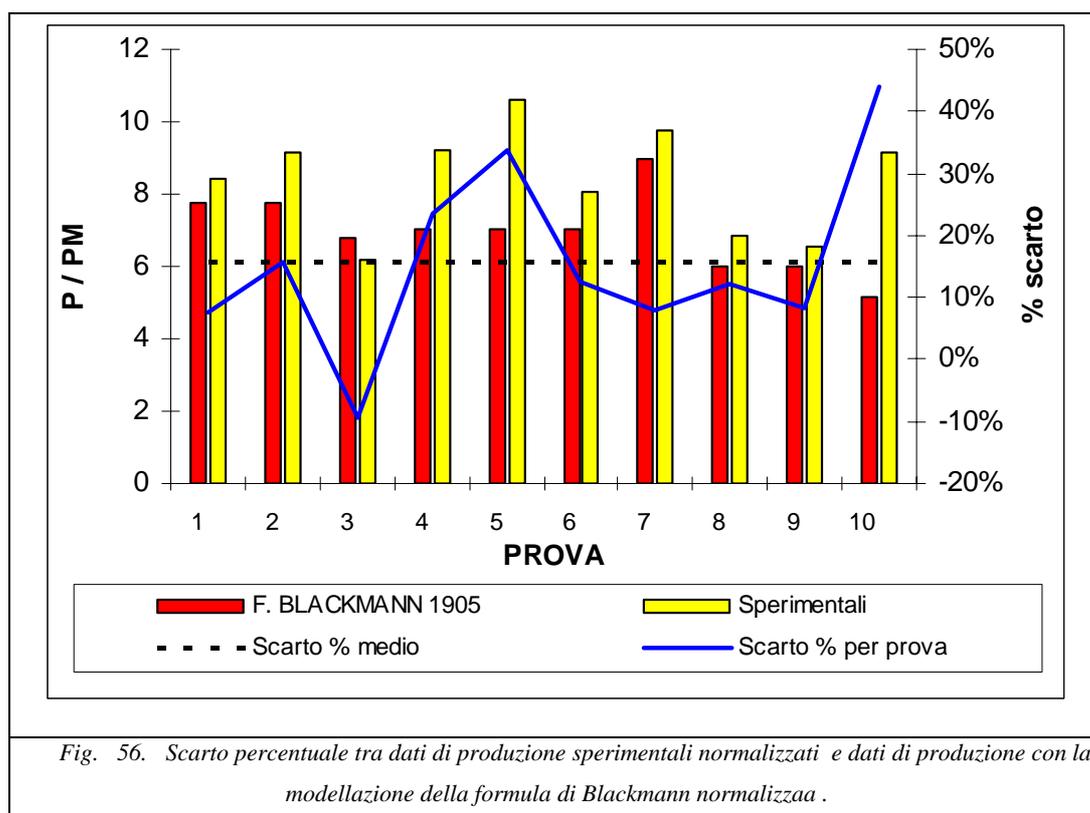
Con i dati di la produzione di ossigeno derivanti da tutte le prove, del 2009, simulate con il modello di Blackmann (1905), e i dati sperimentali si opera l'analisi di sensibilità comparativa.

Grafico in cui s'illustra l'analisi di sensibilità comparativa tra dati sperimentali normalizzati e formula di Blackmann (1905) normalizzata



Da quanto si evince dal grafico si può affermare che la formula di Blackmann (1905) sottostima la produzione di ossigeno disciolto da parte degli autotrofi, infatti, tutti i punti che rappresentano la produzione che realizza la formula di Blackmann si collocano al di sotto della retta.

Grafico in cui s'illustra : la produzione stimata con il modello, la produzione misurata normalizzata, lo scarto percentuale per ogni prova, lo scarto percentuale medio tra i dati sperimentali e quelli modellati con la formula di Blackmann(1905) normalizzata.



Nel grafico si mostra lo scostamento percentuale della formula di Blackmann (1905) dai dati sperimentali per ogni prova utile simulata. Si può inoltre registrare che la formulazione di Blackmann (1905) dai dati sperimentali ha uno scostamento percentuale medio è del 16 %.

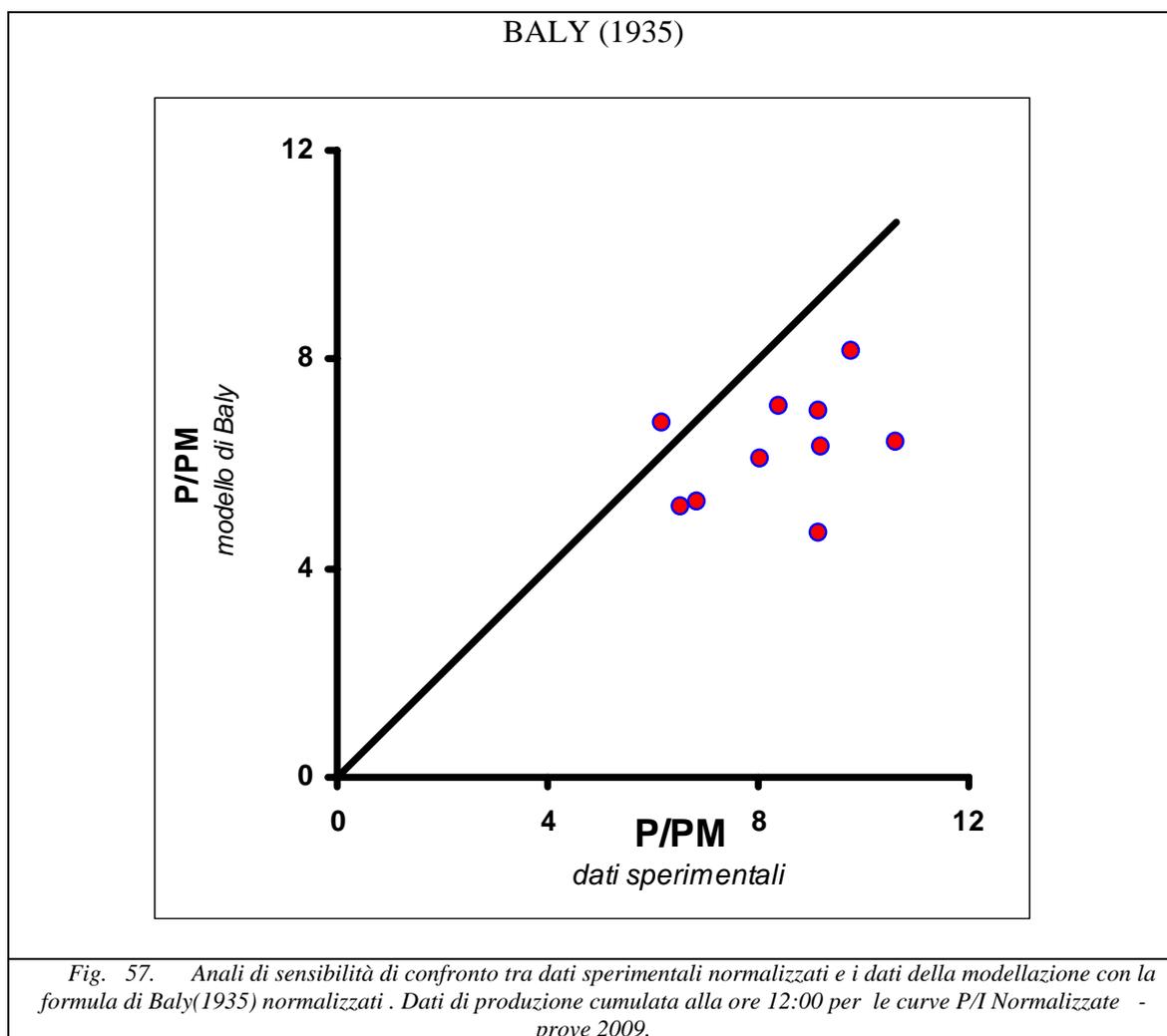
*Analisi dati : (Modello Baly(1935) -Dati sperimentali)*

*produzione cumulata alle ore 12:00*

<b>Dati normalizzati modello di Baly (1935)</b>	
<i>data</i>	<i>P/PM</i>
11-giu	7.10
14-lug	7.03
23-lug	6.76
28-lug	6.30
30-lug	6.42
11-set	6.10
15-set	8.16
7-ott	5.27
1-nov	5.17
20-nov	4.66
<i>media</i>	<b>6.30</b>
<i>min</i>	4.66
<i>max</i>	8.16
<i>dev standard</i>	1.05

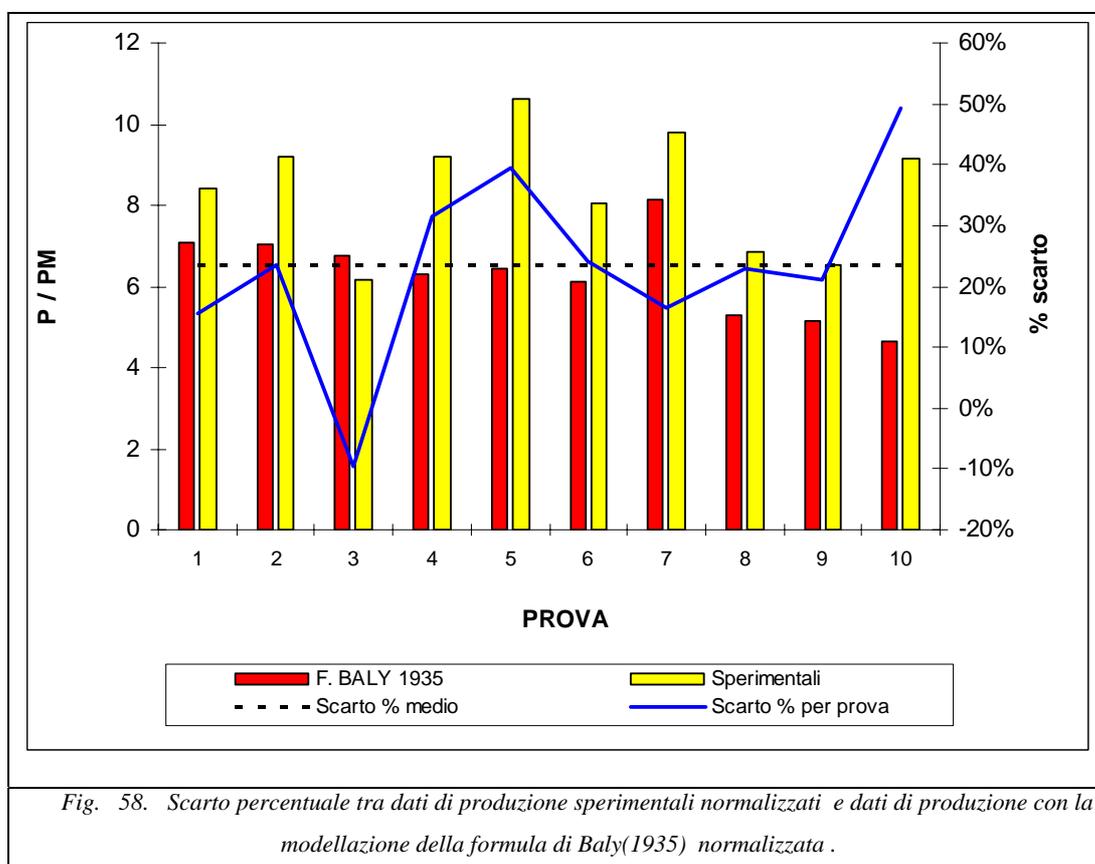
Tab. 19: Prove utili – formula di Baly (1935) dati simulati normalizzati

Grafico in cui si illustra l'analisi di sensibilità comparativa tra dati sperimentali normalizzati e formula modellata di Baly (1935) normalizzata



La formula di Baly (1935) sottostima la produzione di ossigeno disciolto da parte degli autotrofi, infatti, tutti i punti che rappresentano la produzione che realizza la formula di Baly si collocano al di sotto della retta.

Grafico in cui s'illustra: la produzione stimata con il modello , la produzione misurata normalizzata, lo scarto percentuale per ogni prova, lo scarto percentuale medio tra i dati sperimentali e quelli modellati con la formula di Baly (1935) normalizzata.



La formulazione di Baly (1935) dai dati sperimentali ha uno scostamento percentuale medio è del 23 %.

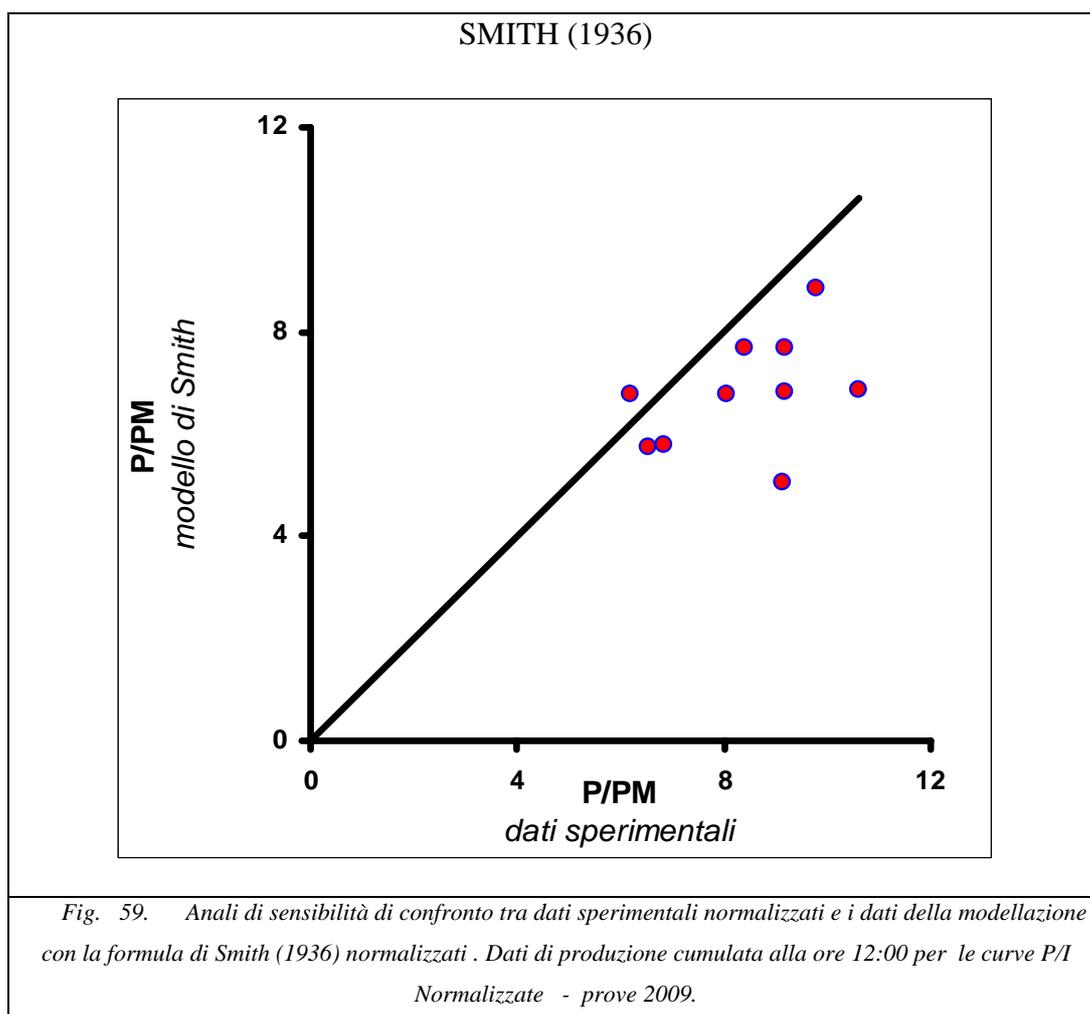
*Analisi dati : (Modello Smith(1936) -Dati sperimentali)*

*produzione cumulata alle ore 12:00*

<b>Dati normalizzati modello di Smith (1936)</b>	
<i>data</i>	<i>P/PM</i>
11-giu	7.69
14-lug	7.66
23-lug	6.76
28-lug	6.84
30-lug	6.88
11-set	6.78
15-set	8.85
7-ott	5.79
1-nov	5.76
20-nov	5.06
<i>media</i>	<b>6.81</b>
<i>min</i>	5.06
<i>max</i>	8.85
<i>dev standard</i>	1.10

Tab. 20: Prove utili – formula di Smith (1936) dati simulati normalizzati

Grafico in cui si illustra l'analisi di sensibilità comparativa tra dati sperimentali normalizzati e formula di Smith (1936) normalizzata



La formula di Smith (1936) sottostima la produzione di ossigeno disciolto da parte degli autotrofi.

Grafico in cui s'illustra : la produzione stimata con il modello , la produzione misurata normalizzata, lo scarto percentuale per ogni prova, lo scarto percentuale medio tra i dati sperimentali e quelli modellati con la formula di Smith (1936).

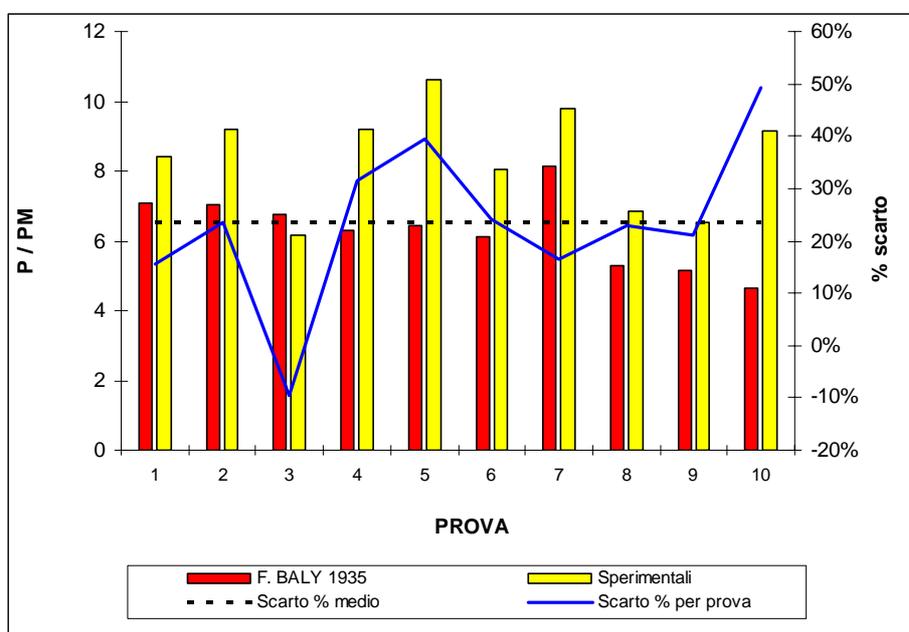


Fig. 60. Scarto percentuale tra dati di produzione sperimentali normalizzati e dati di produzione con la modellazione della formula di Smith(1936) normalizzata .

La formulazione di Smith (1936) dai dati sperimentali ha uno scostamento percentuale medio è del 17 %.

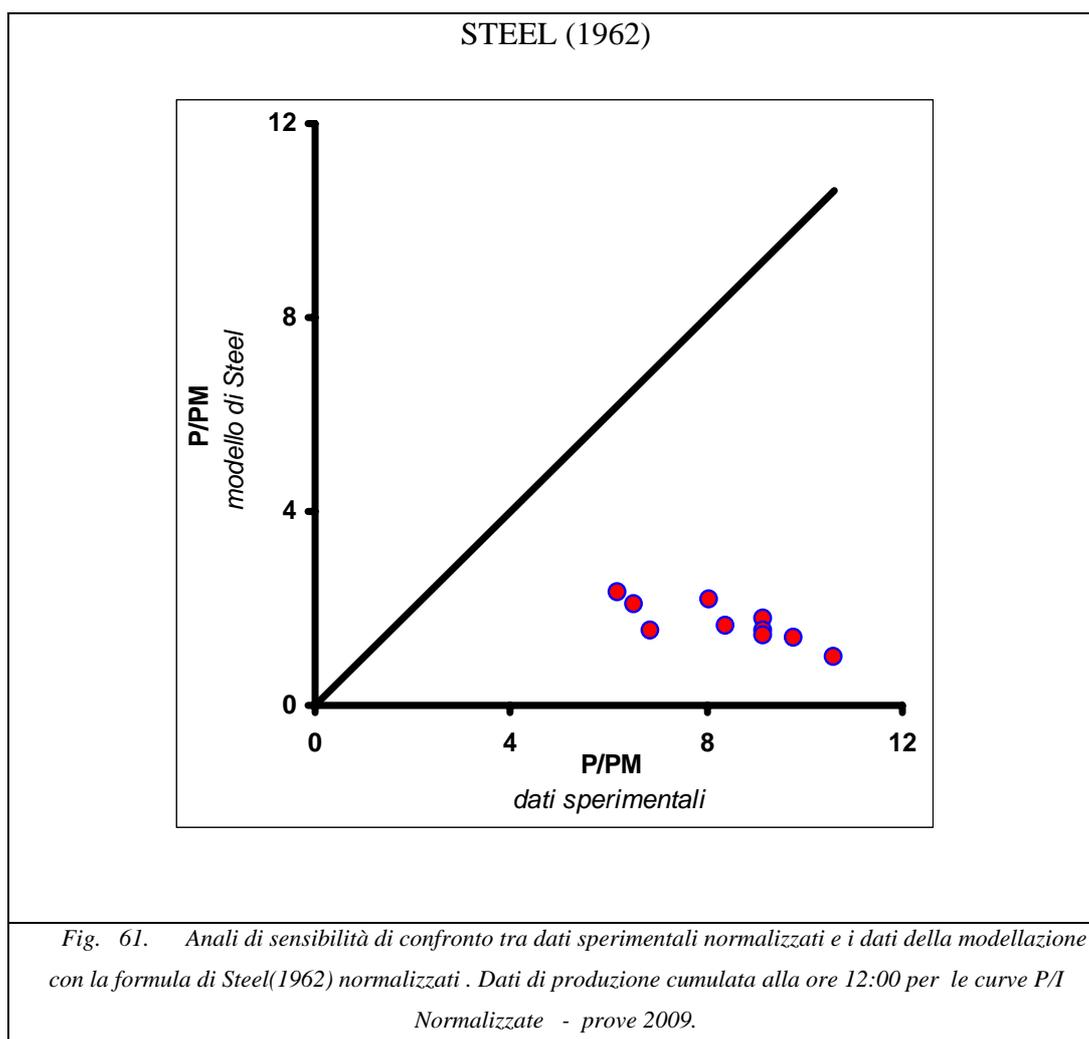
*Analisi dati : (Modello Steel (1962) -Dati sperimentali)*

*produzione cumulata alle ore 12:00*

<b>Dati normalizzati modello di Steel (1962)</b>	
<i>data</i>	<i>P/PM</i>
11-giu	1.61
14-lug	1.76
23-lug	2.32
28-lug	1.51
30-lug	0.97
11-set	2.17
15-set	1.40
7-ott	1.54
1-nov	2.09
20-nov	1.44
<b><i>media</i></b>	<b><i>1.68</i></b>
<i>min</i>	<i>0.97</i>
<i>max</i>	<i>2.32</i>
<i>dev standard</i>	<i>0.17</i>

Tab. 21: Prove utili – formula di Steel (1962) dati simulati normalizzati

Grafico in cui si illustra l'analisi di sensibilità comparativa tra dati sperimentali normalizzati e la formula di Steel (1962) normalizzata



La formula di Steel sottostima la produzione di ossigeno disciolto da parte degli autotrofi.

Grafico in cui s'illustra : la produzione stimata con il modello , la produzione misurata normalizzata, lo scarto percentuale per ogni prova, lo scarto percentuale medio tra i dati sperimentali e quelli modellati con la formula di Steel (1962) normalizzata .

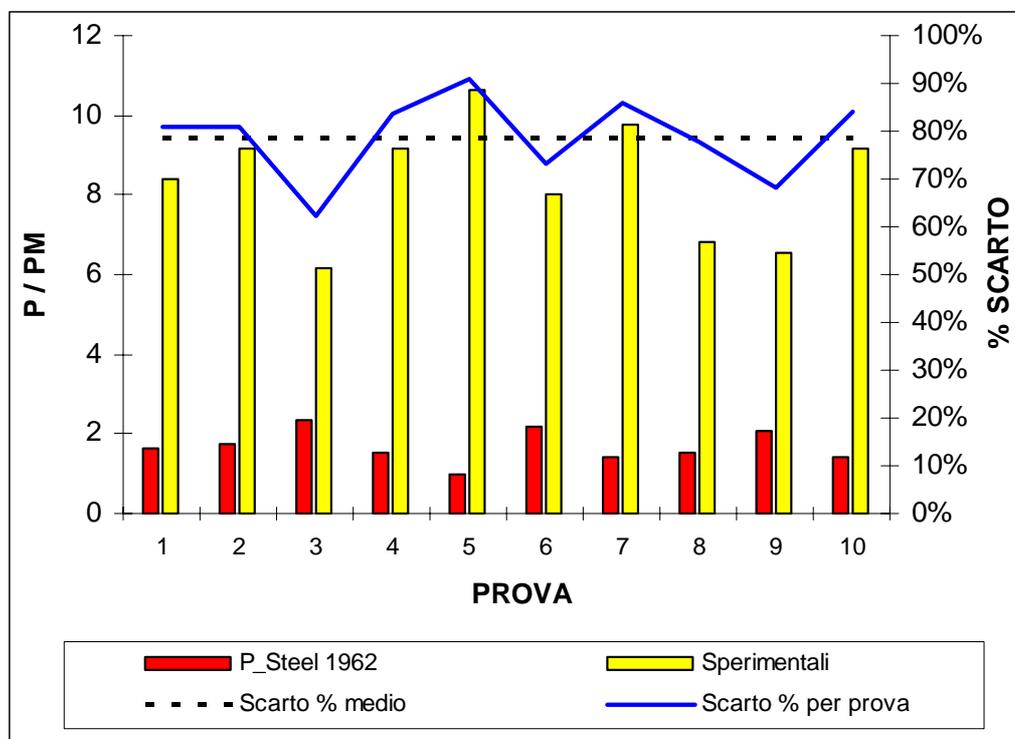


Fig. 62. Scarto percentuale tra dati di produzione sperimentali normalizzati e dati di produzione con la modellazione della formula di Steel(1962) normalizzata .

La formulazione di Steel (1962) dai dati sperimentali ha uno scostamento percentuale medio è del 79 %.

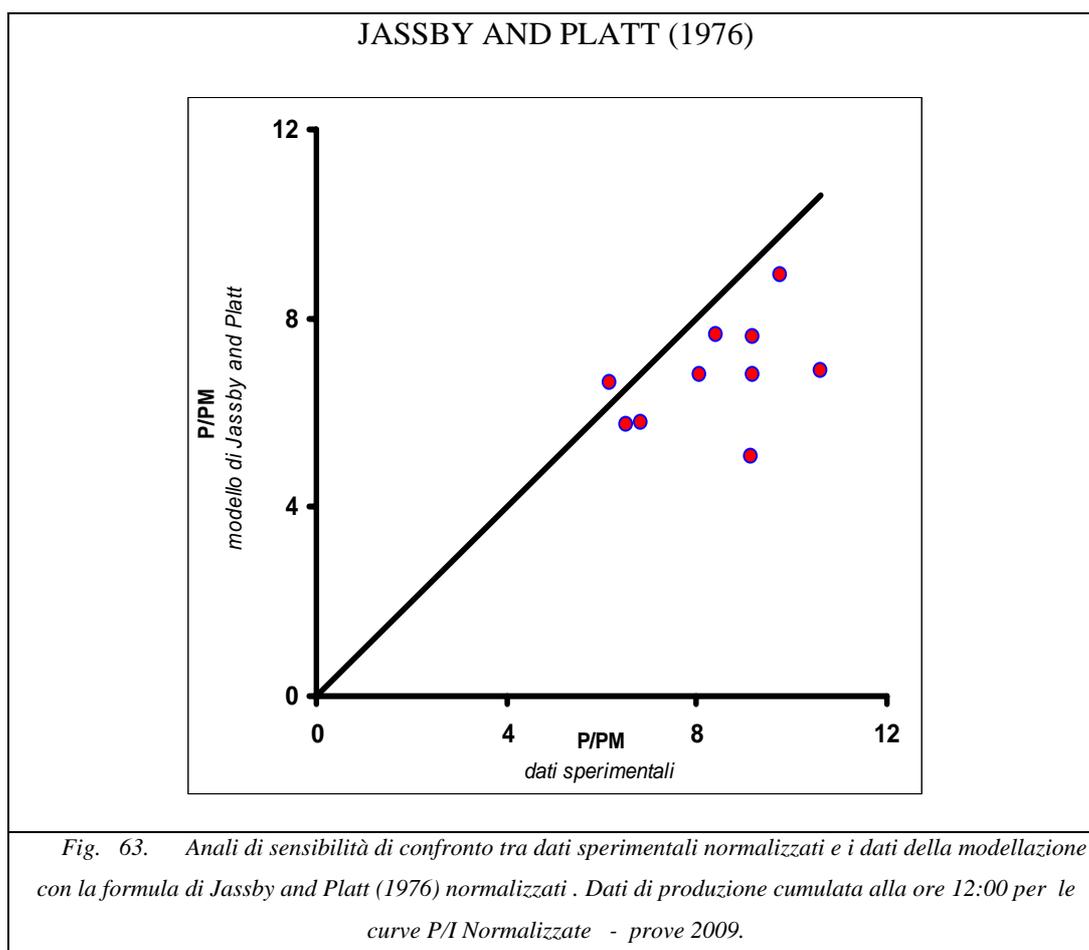
*Analisi dati : (Modello Jassby and Platt(1976) -Dati sperimentali)*

*produzione cumulata alle ore 12:00*

<b>Dati normalizzati modello di Jassby and Platt (1976)</b>	
<i>data</i>	<i>P/PM</i>
11-giu	7.64
14-lug	7.63
23-lug	6.62
28-lug	6.82
30-lug	6.88
11-set	6.79
15-set	8.92
7-ott	5.79
1-nov	5.76
20-nov	5.05
<i>media</i>	<b>6.79</b>
<i>min</i>	5.05
<i>max</i>	8.92
<i>dev standard</i>	1.11

Tab. 22: Prove utili – formula di Jassby and Platt (1976) dati simulati normalizzati

Grafico in cui s'illustra l'analisi di sensibilità comparativa tra dati sperimentali normalizzati e formula di Jassby and Platt (1976) normalizzata



La formula di Jassby and Platt sottostima la produzione di ossigeno disciolto da parte degli autotrofi.

Grafico in cui s'illustra : la produzione stimata con il modello , la produzione misurata normalizzata, lo scarto percentuale per ogni prova, lo scarto percentuale medio tra i dati sperimentali e quelli modellati con la formula di Jassby and Platt (1976).

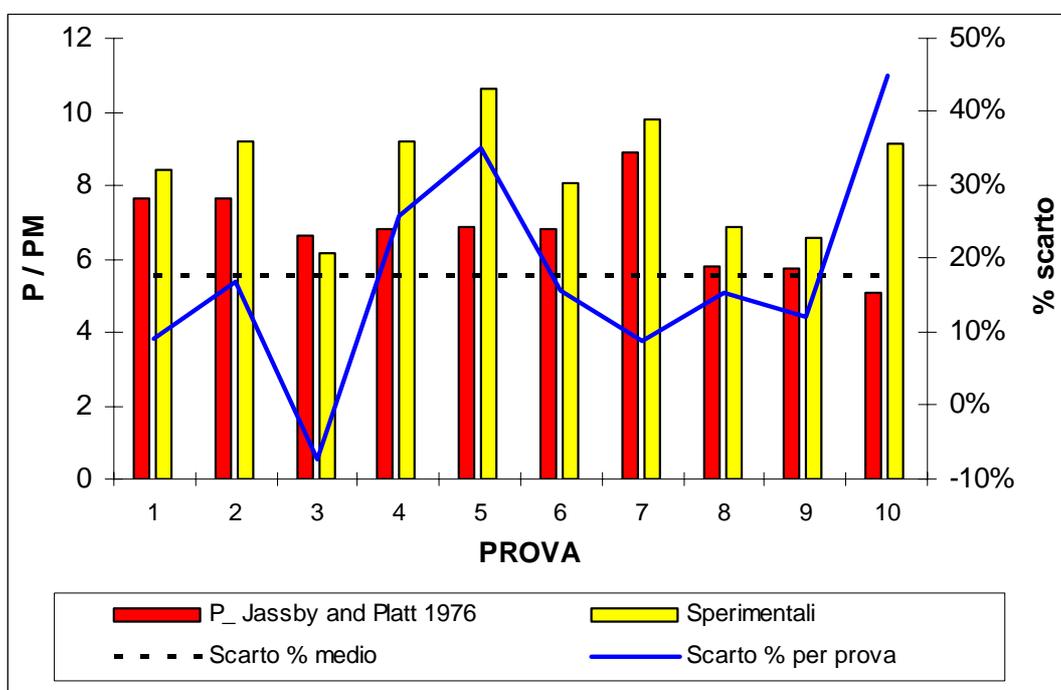


Fig. 64. Scarto percentuale tra dati di produzione sperimentali normalizzati e dati di produzione con la modellazione della formula di Jassby and Platt (1976) normalizzata .

La formulazione di Jassby and Platt (1976) dai dati sperimentali ha uno scostamento percentuale medio è del 18 %.

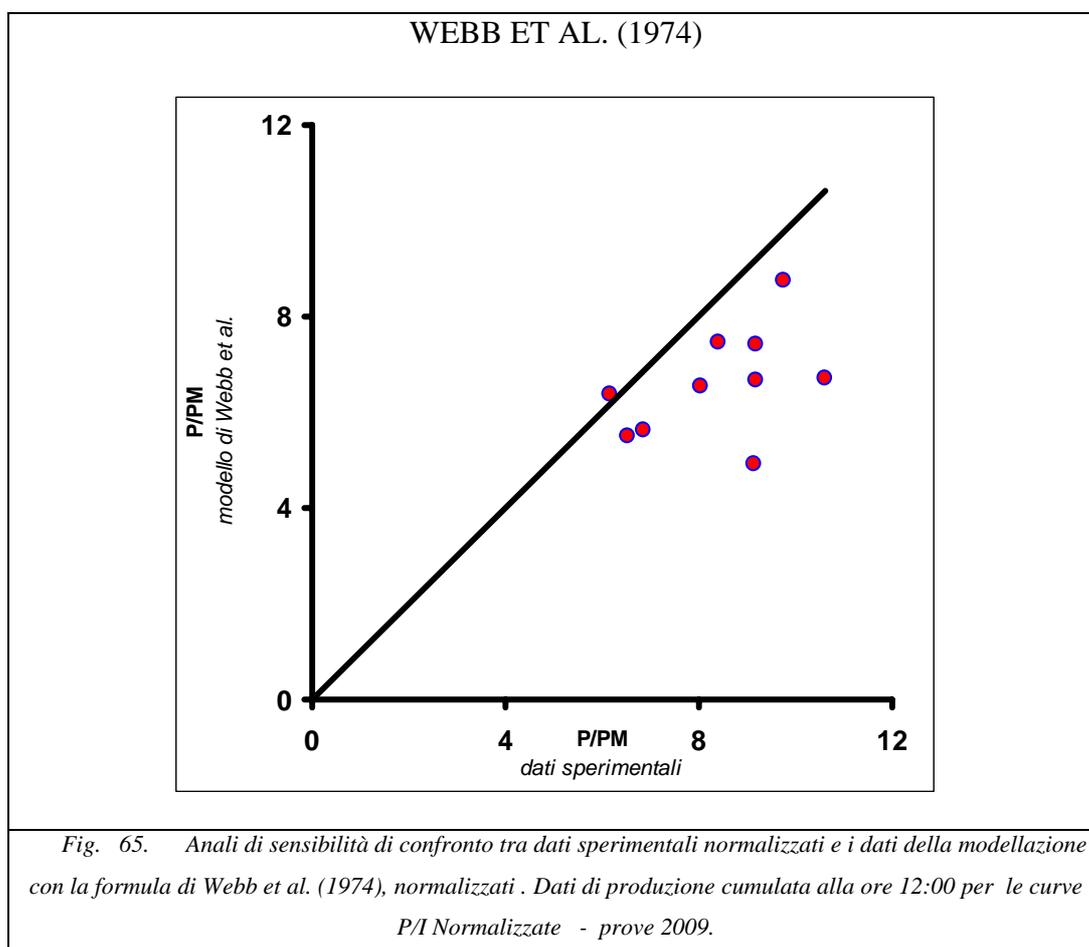
*Analisi dati : (Modello Webb et al.(1974) -Dati sperimentali)*

*produzione cumulata alle ore 12:00*

<b>Dati normalizzati modello di Webb et al. (1974)</b>	
<i>data</i>	<i>P/PM</i>
11-giu	7.47
14-lug	7.44
23-lug	6.37
28-lug	6.65
30-lug	6.72
11-set	6.55
15-set	8.74
7-ott	5.61
1-nov	5.52
20-nov	4.90
<i>media</i>	<b>6.60</b>
<i>min</i>	4.90
<i>max</i>	8.74
<i>dev standard</i>	1.24

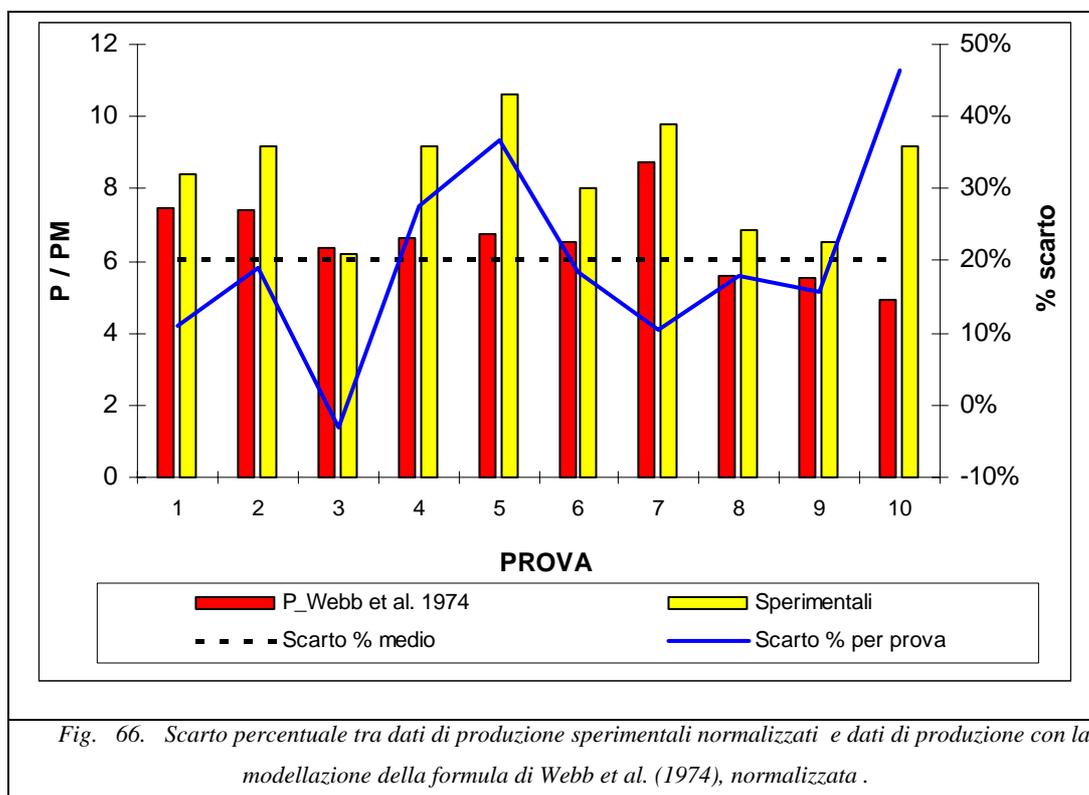
Tab. 23: Prove utili – formula di Webb et al. (1974) dati simulati normalizzati

Grafico in cui si illustra l'analisi di sensibilità comparativa tra dati sperimentali normalizzati e formula di Webb et al. (1974) normalizzata



La formula di Webb et al. (1974), sottostima la produzione di ossigeno disciolto da parte degli autotrofi.

Grafico in cui s'illustra : la produzione stimata con il modello , la produzione misurata normalizzata, lo scarto percentuale per ogni prova, lo scarto percentuale medio tra i dati sperimentali e quelli modellati con la formula di Webb et al. (1974).



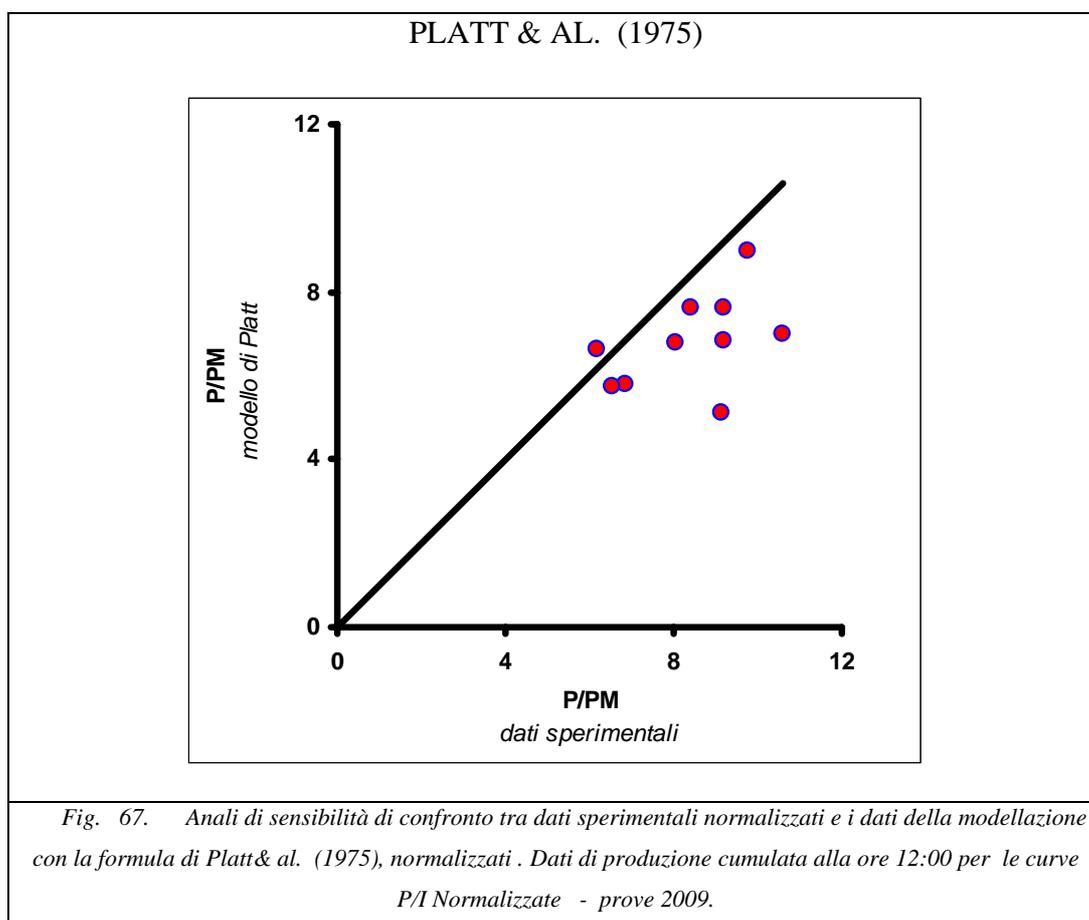
La formulazione di Webb et al.(1974) dati sperimentali ha uno scostamento percentuale medio è del 20 %.

*Analisi dati : (Modello Platt et al. (1975)-Dati sperimentali)*

*produzione cumulata alle ore 12:00*

<b>Dati normalizzati modello di Platt et al. (1975)</b>	
<i>data</i>	<i>P/PM</i>
11-giu	7.63
14-lug	7.61
23-lug	6.63
28-lug	6.82
30-lug	6.97
11-set	6.79
15-set	8.96
7-ott	5.78
1-nov	5.76
20-nov	5.09
<b><i>media</i></b>	<b>6.80</b>
<i>min</i>	5.09
<i>max</i>	8.96
<i>dev standard</i>	1.11

Grafico in cui si illustra l'analisi di sensibilità comparativa tra dati sperimentali normalizzati e formula di Platt & al. (1975) normalizzata



La formula di Platt & al. (1975), sottostima la produzione di ossigeno disciolto da parte degli autotrofi.

Grafico in cui si illustra : la produzione stimata con il modello , la produzione misurata normalizzata, lo scarto percentuale per ogni prova, lo scarto percentuale medio tra i dati sperimentali e quelli modellati con la formula di Platt & al. (1975)

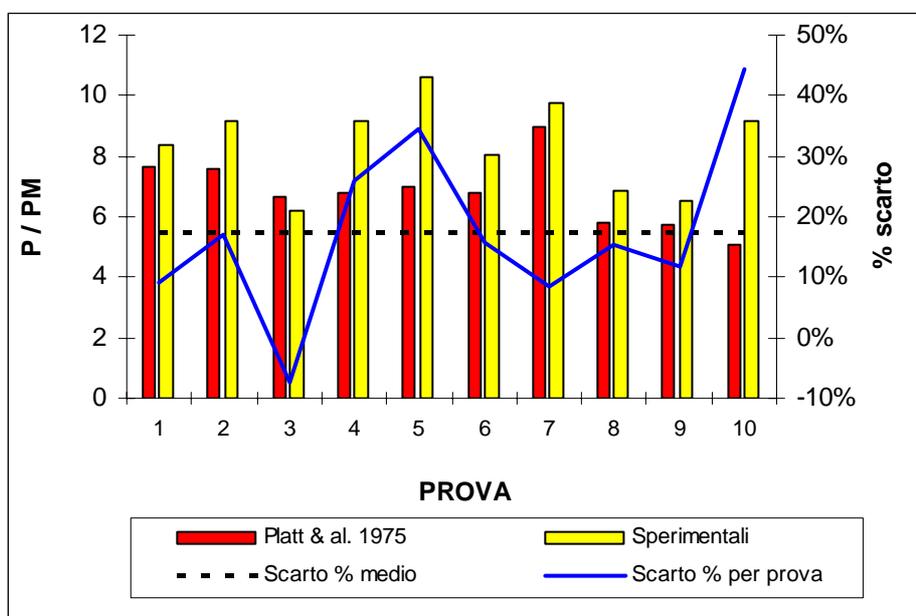


Fig. 68. Scarto percentuale tra dati di produzione sperimentali normalizzati e dati di produzione con la modellazione della formula di Platt & al. (1975), normalizzata .

La formulazione di Platt & al. (1975) dati sperimentali ha uno scostamento percentuale medio è del 17 %.

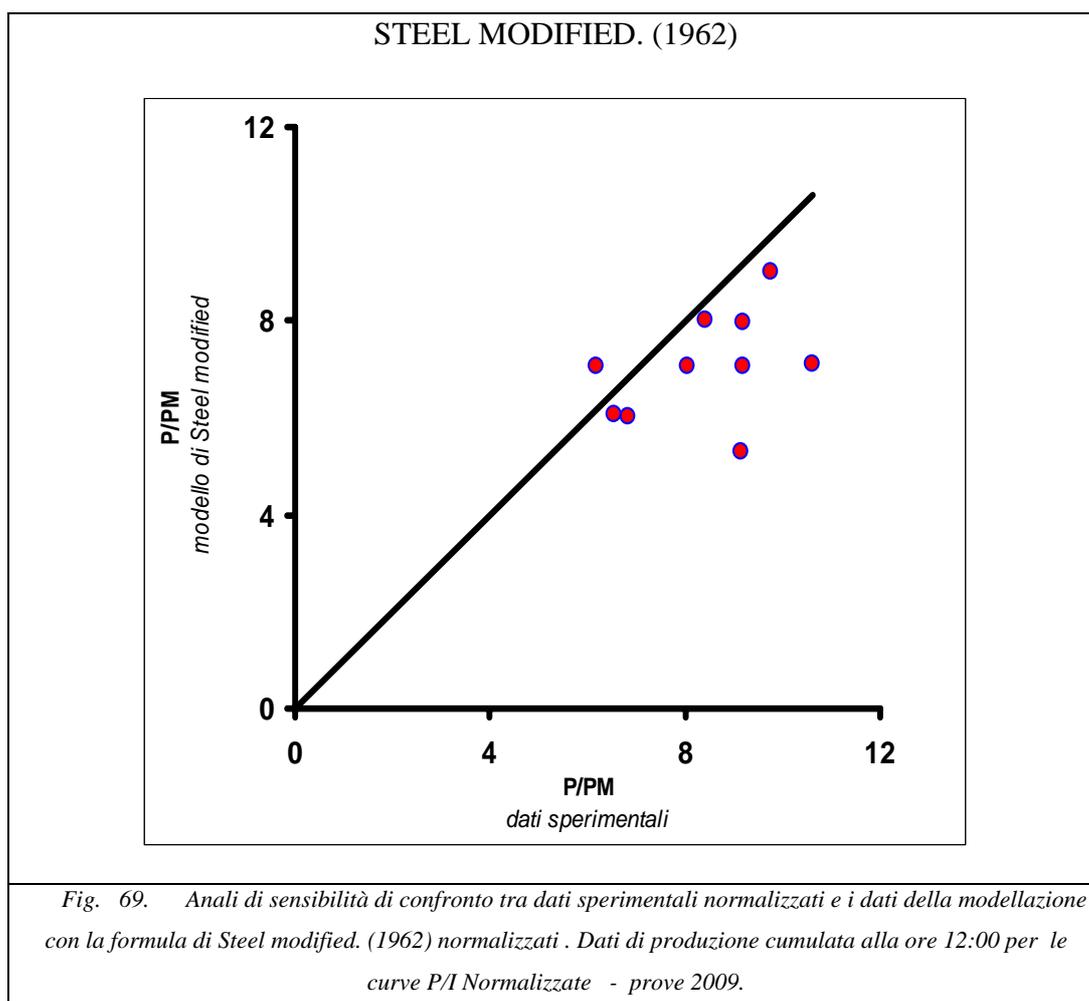
*Analisi dati : (Modello Steel modified. (1962) -Dati sperimentali)*

*produzione cumulata alle ore 12:00*

<b>Dati normalizzati modello di Steel modified. (1962)</b>	
<i>data</i>	<i>P/PM</i>
11-giu	7.99
14-lug	7.98
23-lug	7.05
28-lug	7.08
30-lug	7.10
11-set	7.09
15-set	9.00
7-ott	6.03
1-nov	6.07
20-nov	5.30
<i>media</i>	<b>7.07</b>
<i>min</i>	5.30
<i>max</i>	9.00
<i>dev standard</i>	1.09

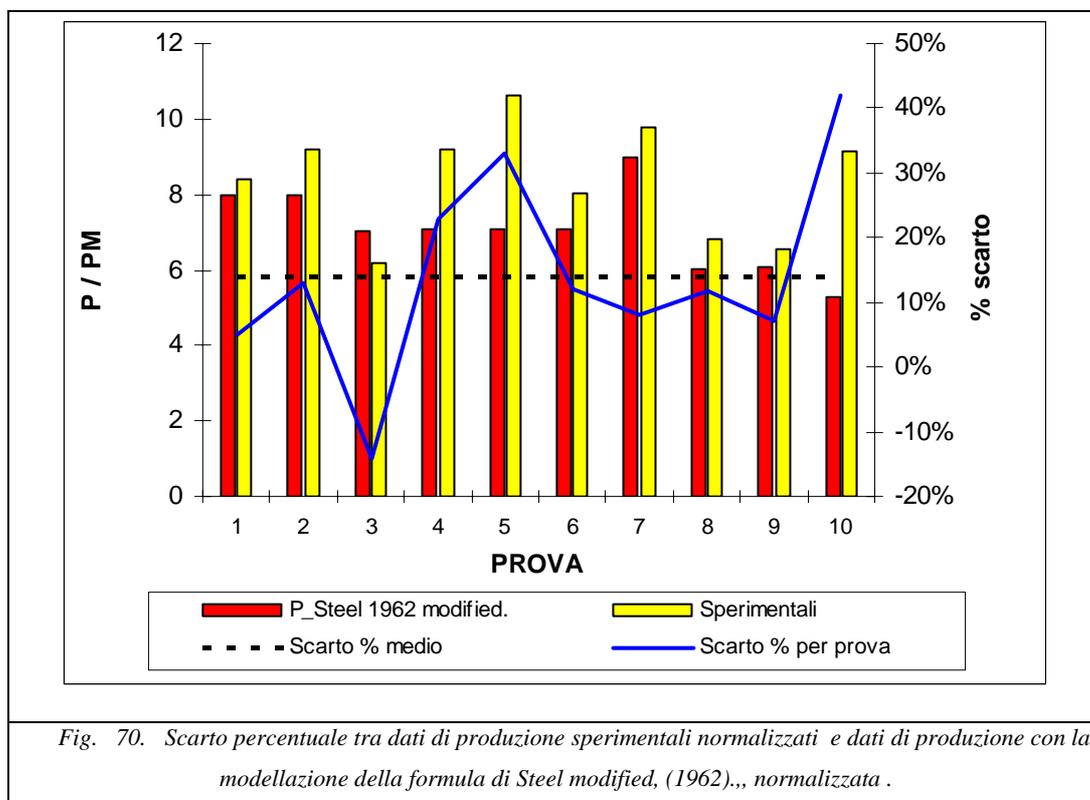
Tab. 24: Prove utili – formula di Steel modified. (1962) dati simulati normalizzati

Grafico in cui si illustra l'analisi di sensibilità comparativa tra dati sperimentali normalizzati e formula di Steel modified. (1962) normalizzata



La formula di Steel modified.(1962), sottostima la produzione di ossigeno disciolto da parte degli autotrofi.

Grafico in cui si illustra :la produzione stimata con il modello , la produzione misurata normalizzata, lo scarto percentuale per ogni prova, lo scarto percentuale medio tra i dati sperimentali e quelli modellati con la e formula di Steel modified. (1962) normalizzata.



La formulazione di Steel modified. (1962)., dati sperimentali ha uno scostamento percentuale medio è del 14 %.

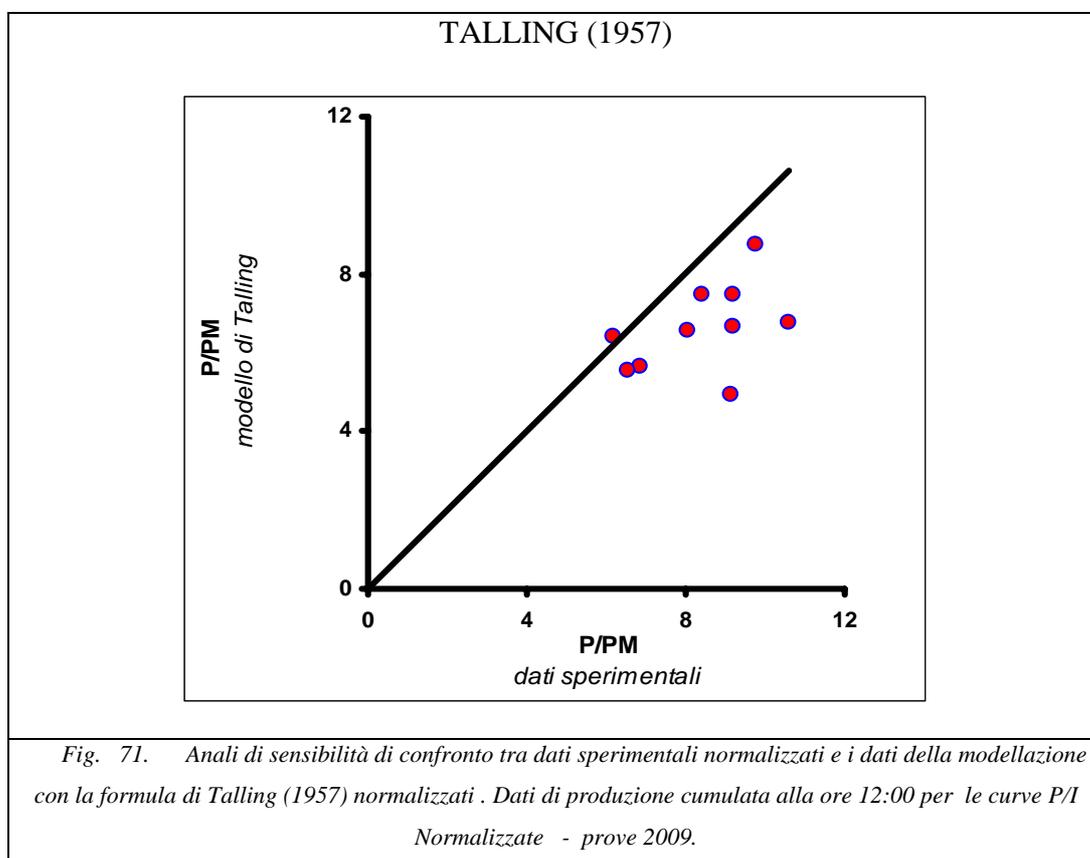
*Analisi dati : (Modello Talling (1957)) -Dati sperimentali)*

*produzione cumulata alle ore 12:00*

<b>Dati normalizzati modello di Talling (1957)</b>	
<i>data</i>	<i>P/PM</i>
11-giu	7.50
14-lug	7.46
23-lug	6.42
28-lug	6.68
30-lug	6.75
11-set	6.57
15-set	8.73
7-ott	5.64
1-nov	5.56
20-nov	4.92
<i>media</i>	<b>6.62</b>
<i>min</i>	4.92
<i>max</i>	8.73
<i>dev standard</i>	1.10

Tab. 25: Prove utili – formula di Talling (1957) dati simulati normalizzati

Grafico in cui si illustra l'analisi di sensibilità comparativa tra dati sperimentali normalizzati e la formula di Talling (1957) normalizzata



La formula di Talling (1957), sottostima la produzione di ossigeno disciolto da parte degli autotrofi.

Grafico in cui si illustra : la produzione stimata con il modello , la produzione misurata normalizzata, lo scarto percentuale per ogni prova, lo scarto percentuale medio tra i dati sperimentali e quelli modellati con la la formula di Talling (1957) normalizzata

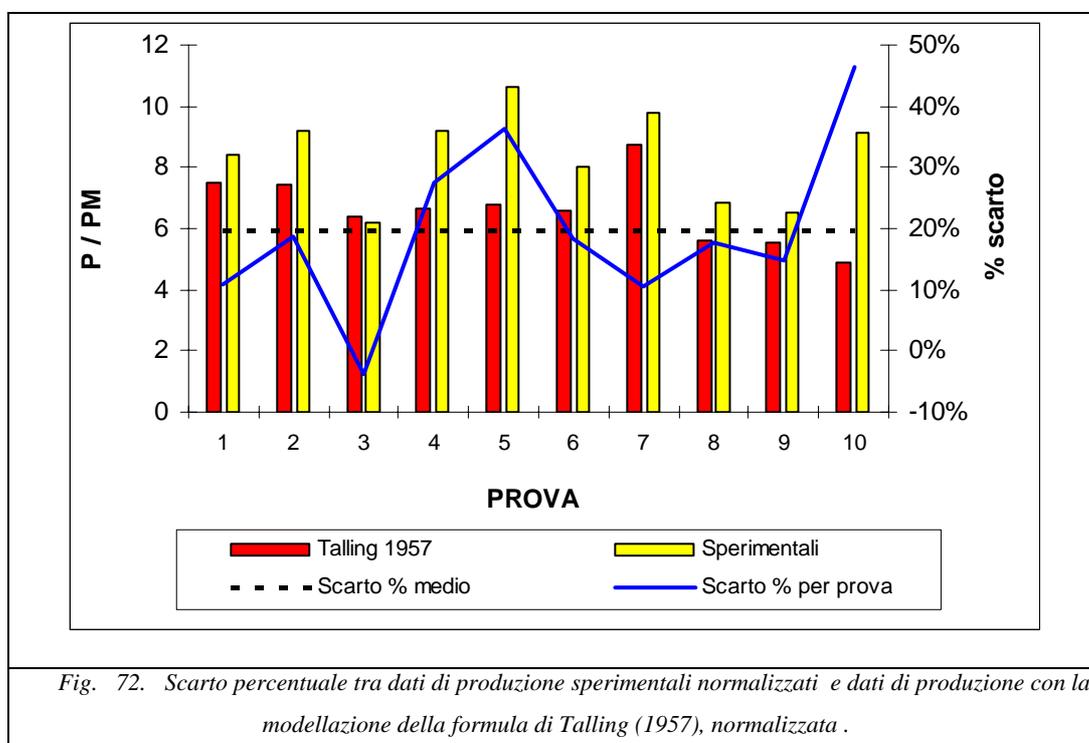


Fig. 72. Scarto percentuale tra dati di produzione sperimentali normalizzati e dati di produzione con la modellazione della formula di Talling (1957), normalizzata .

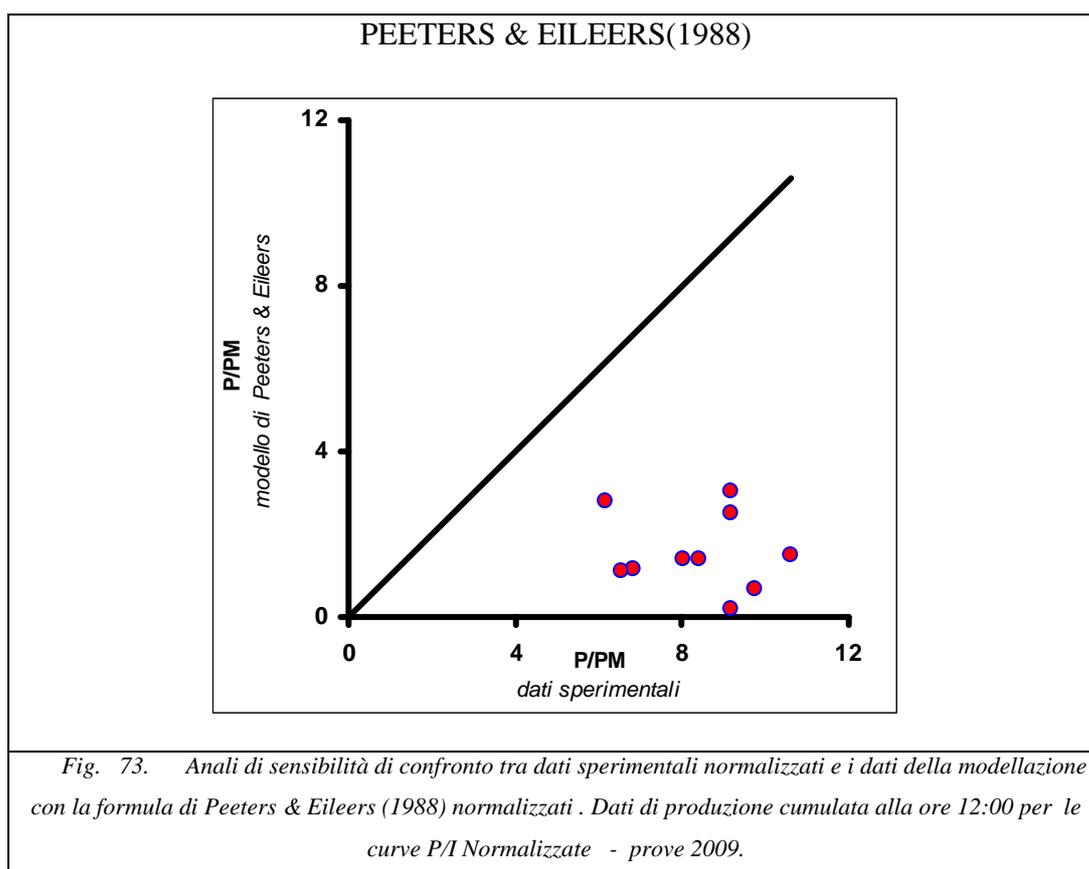
La formulazione di Talling (1957), dati sperimentali ha uno scostamento percentuale medio è del 20 %.

*Analisi dati : (Modello Peeters & Eileers (1988) -Dati sperimentali-  
produzione cumulata alle ore 12:00)*

<b>Dati normalizzati modello di Peeters &amp; Eileers (1988)</b>	
<i>data</i>	<i>P/PM</i>
11-giu	1.39
14-lug	2.49
23-lug	2.80
28-lug	3.04
30-lug	1.48
11-set	1.41
15-set	0.67
7-ott	1.15
1-nov	1.09
20-nov	0.19
<i>media</i>	<i>1.57</i>
<i>min</i>	<i>0.19</i>
<i>max</i>	<i>3.04</i>
<i>dev standard</i>	<i>0.93</i>

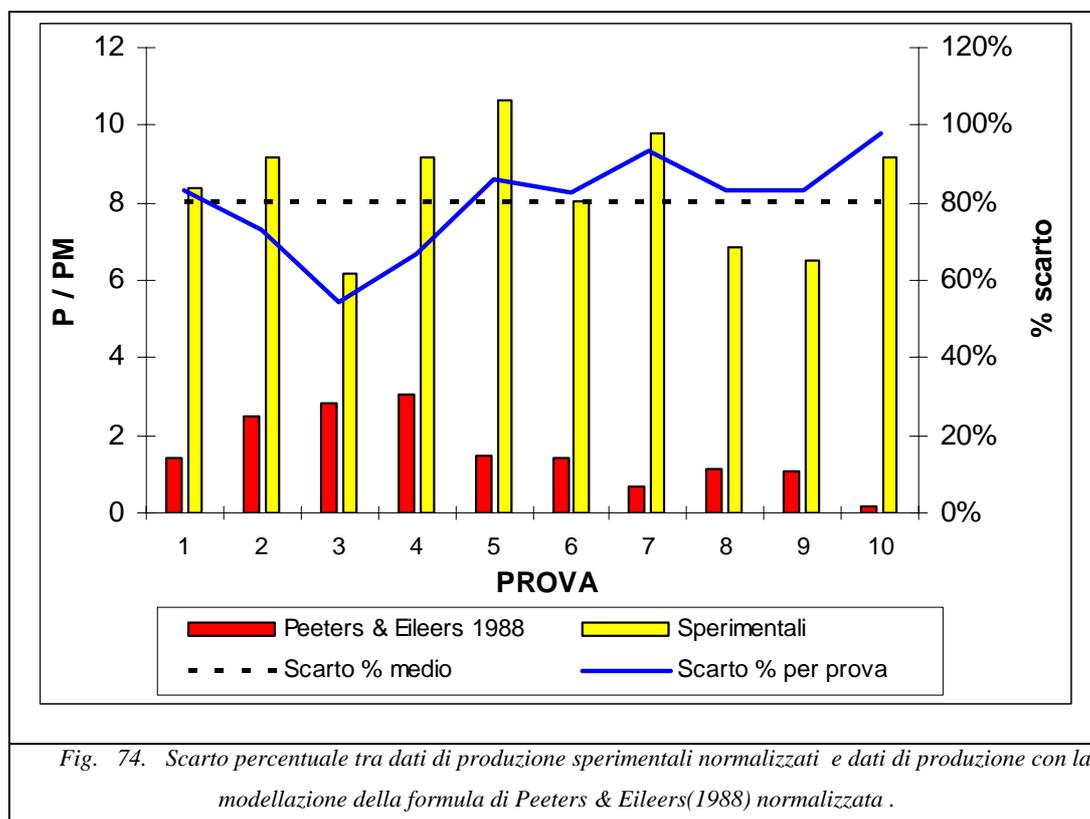
Tab. 26: Prove utili – formula di Peeters & Eileers(1988) dati simulati normalizzati

Grafico in cui si illustra l'analisi di sensibilità comparativa tra dati sperimentali normalizzati e formula di Peeters & Eileers(1988) normalizzata



La formula di Peeters & Eileers (1988), sottostima la produzione di ossigeno disciolto da parte degli autotrofi.

Grafico in cui si illustra : la produzione stimata con il modello , la produzione misurata normalizzata, lo scarto percentuale per ogni prova, lo scarto percentuale medio tra i dati sperimentali e quelli modellati con la formula di Peeters & Eileers(1988) normalizzata



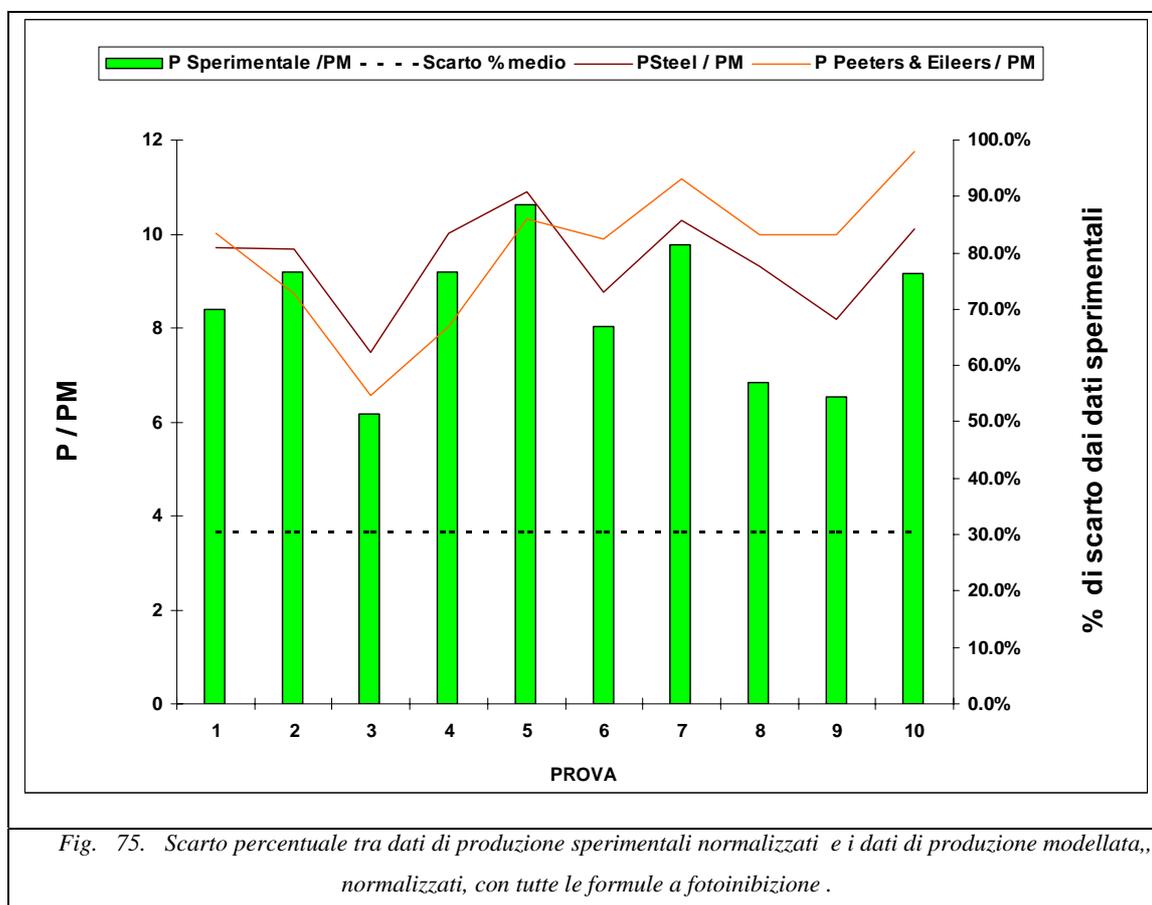
La formulazione di Peeters & Eileers (1988), dai dati sperimentali ha uno scostamento percentuale medio è del 80 %.

*Analisi dati : modelli -Dati sperimentali*

*(produzione cumulata alle ore 12:00)*

Una ulteriore analisi può essere ottenuta mettendo insieme in un solo grafico tutte le formule e gli scarti dalla produzione sperimentale corrispondenti.

Nel grafico seguente sono riportate solo le formule a fotoinibizione modellate



(produzione cumulata alle ore 12:00)

Nel grafico seguente sono riportate solo le formule a saturazione modellate

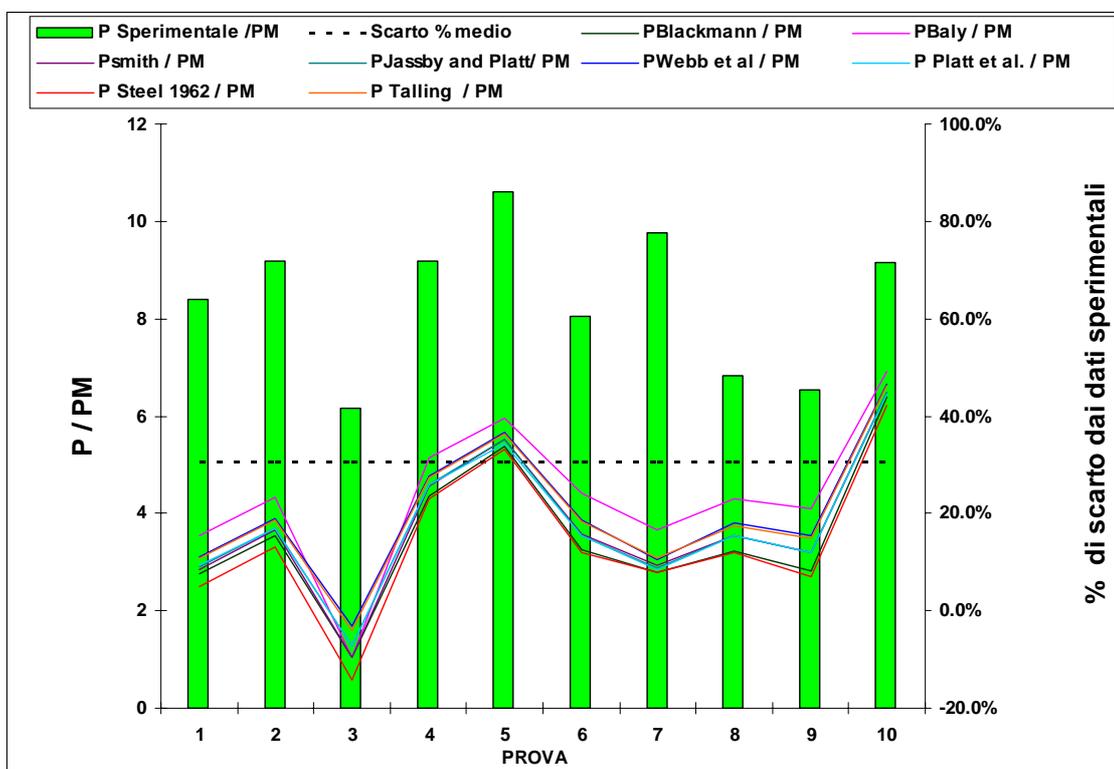
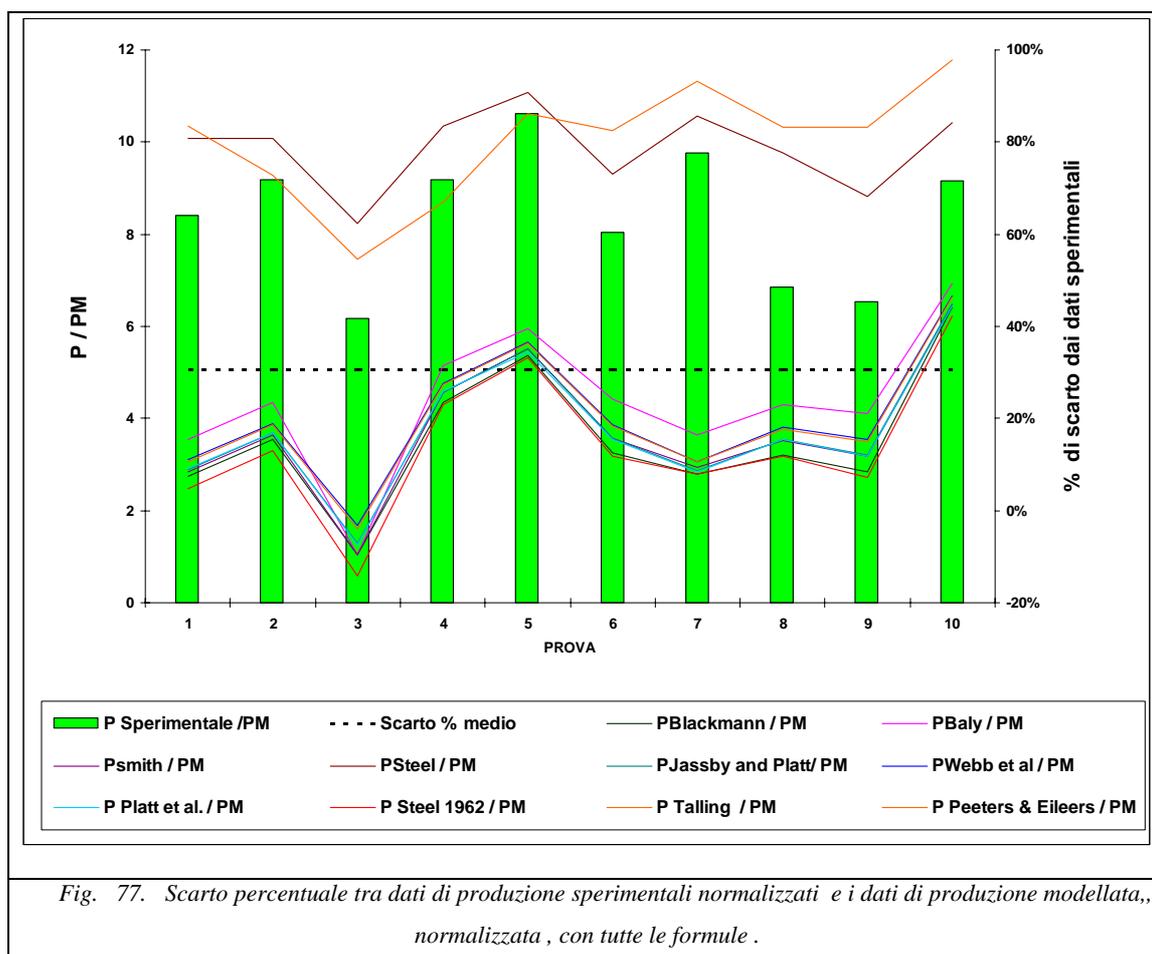


Fig. 76. Scarto percentuale tra dati di produzione sperimentali normalizzati e i dati di produzione modellata,, normalizzata , con tutte le formule a saturazione .

(produzione cumulata alle ore 12:00)

Nel grafico seguente sono riportate tutte le formule modellate



Lo scostamento percentuale medio percentuale tra la produzione misurata e quella modellata è del 30,4 %. Il migliore risultato lo fornisce la formula di Steel, con uno scarto medio percentuale del 14,1 %.

SECONDA ANALISI DI SENSIBILITA'. Sotto l'ipotesi di simmetria tra produzione antimeridiana e pomeridiana delle formule in letteratura, si è analizzata la cumulata giornaliera e fatta una nuova analisi di sensibilità di confronto con i dati sperimentali.

*Analisi dati : (Modello Blackmann (1905))*

*produzione cumulata totale giorno*

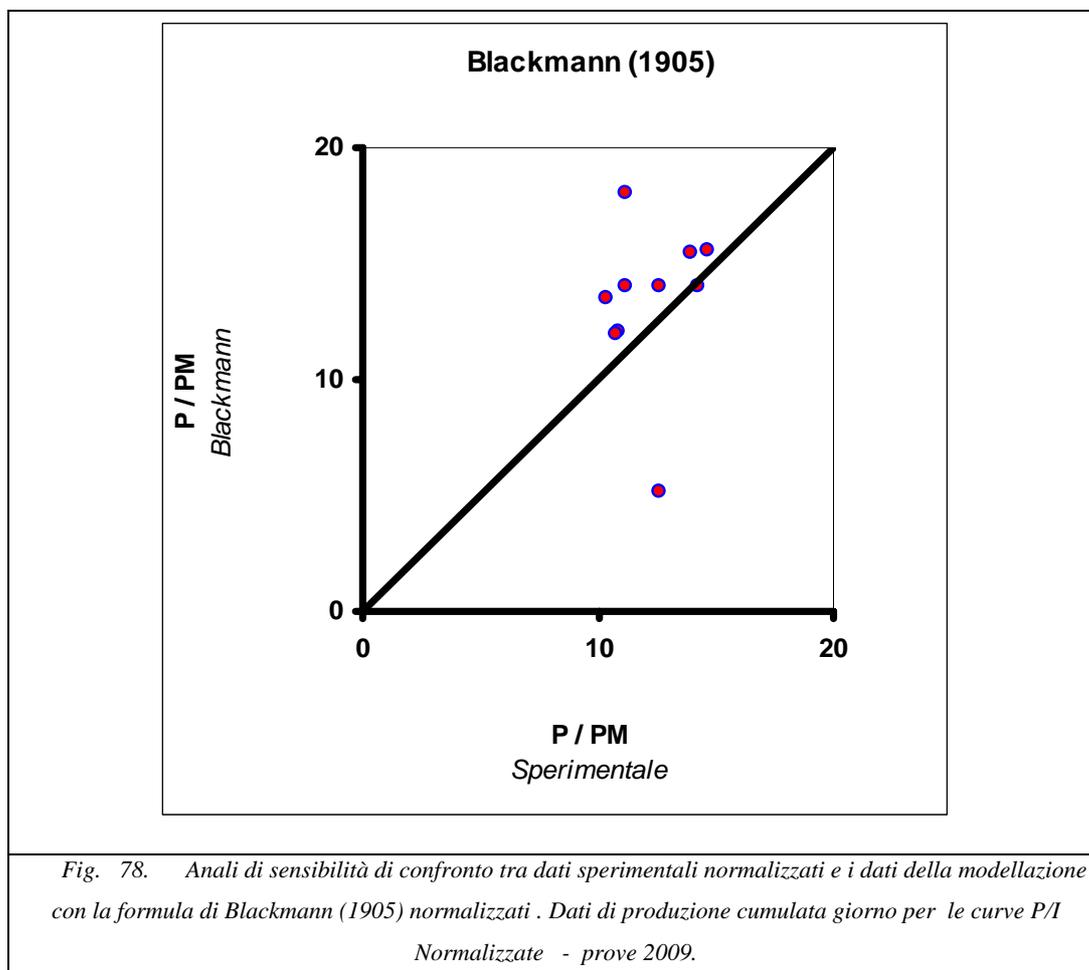
La tabella riporta i dati della simulazione dell'ossigeno disciolto prodotto dalla componente autotrofa, con la formula di Blackmann, per tutte le prove utili.

<b>Dati normalizzati modello di Blackmann (1905)</b>	
<i>data</i>	<i>P/PM</i>
11-giu	15.54
14-lug	15.50
23-lug	13.52
28-lug	14.06
30-lug	14.06
11-set	14.07
15-set	18.00
7-ott	12.02
1-nov	11.99
20-nov	10.25
<i>media</i>	13.90
<i>min</i>	10.25
<i>max</i>	18.00
<i>dev standard</i>	2.18

Tab. 27: Prove utili – formula di Blackmann (1905) dati simulati normalizzati

Con i dati di la produzione di ossigeno derivanti da tutte le prove, del 2009, simulate con il modello di Blackmann (1905), e i dati sperimentali si opera l'analisi di sensibilità comparativa.

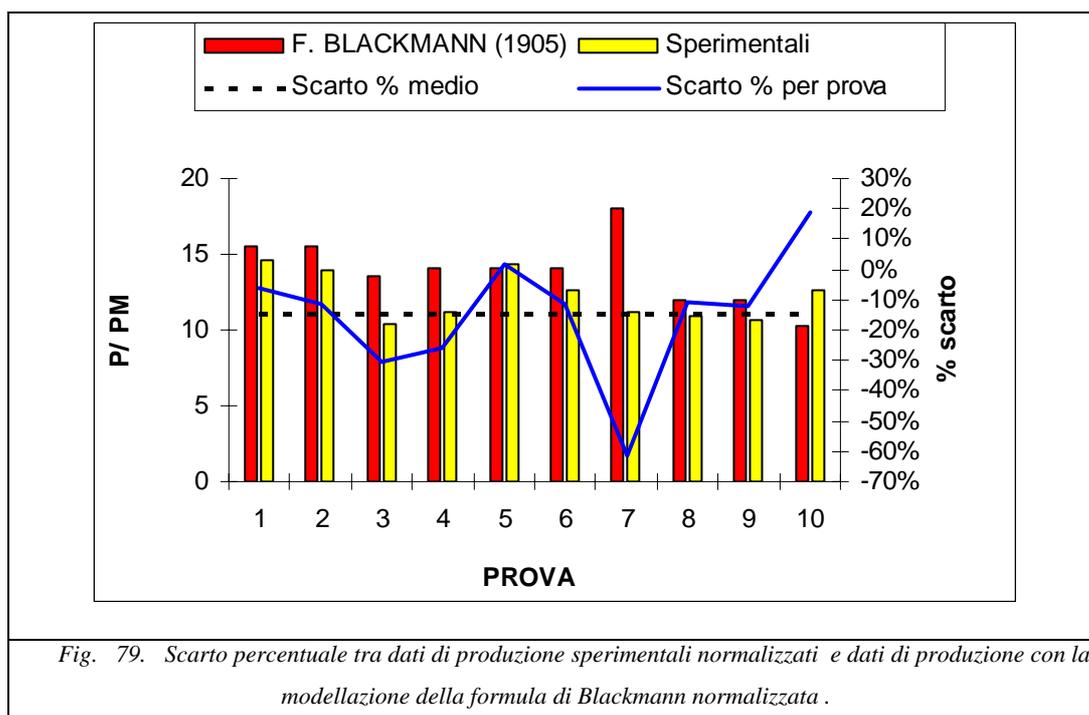
Grafico in cui si illustra l'analisi di sensibilità comparativa tra dati sperimentali normalizzati e formula di Blackmann (1905) modellata normalizzata



Da quanto si evince dal grafico si può affermare che la formula di Blackmann (1905) sovrastima la produzione di ossigeno disciolto da parte degli autotrofi.

Infatti tutti i punti che rappresentano la produzione che realizza la formula di Blackmann si collocano al di sotto della retta.

Grafico in cui s'illustra: la produzione stimata con il modello, la produzione misurata normalizzata, lo scarto percentuale per ogni prova, lo scarto percentuale medio tra i dati sperimentali e quelli modellati con la formula di Blackmann (1905) normalizzata.



Nel grafico si mostra lo scostamento percentuale della formula di Blackmann (1905) dai dati sperimentali per ogni prova utile simulata. Si può inoltre registrare che la formulazione di Blackmann (1905) dai dati sperimentali ha uno scostamento percentuale medio del 15% maggiore.

*Analisi dati : (Modello Baly(1935) -Dati sperimentali)*

*produzione cumulata totale giorno*

<b>Dati normalizzati modello di Baly(1935)</b>	
<i>data</i>	<i>P/PM</i>
11-giu	14.19
14-lug	14.06
23-lug	13.52
28-lug	12.61
30-lug	12.83
11-set	12.21
15-set	16.32
7-ott	10.54
1-nov	10.34
20-nov	9.31
<i>media</i>	<b>12.59</b>
<i>min</i>	9.31
<i>max</i>	16.32
<i>dev standard</i>	2.10

Tab. 28: Prove utili – formula di Baly (1935) dati simulati normalizzati

Grafico in cui s'illustra l'analisi di sensibilità comparativa tra dati sperimentali normalizzati e formula modellata di Baly (1935) normalizzata

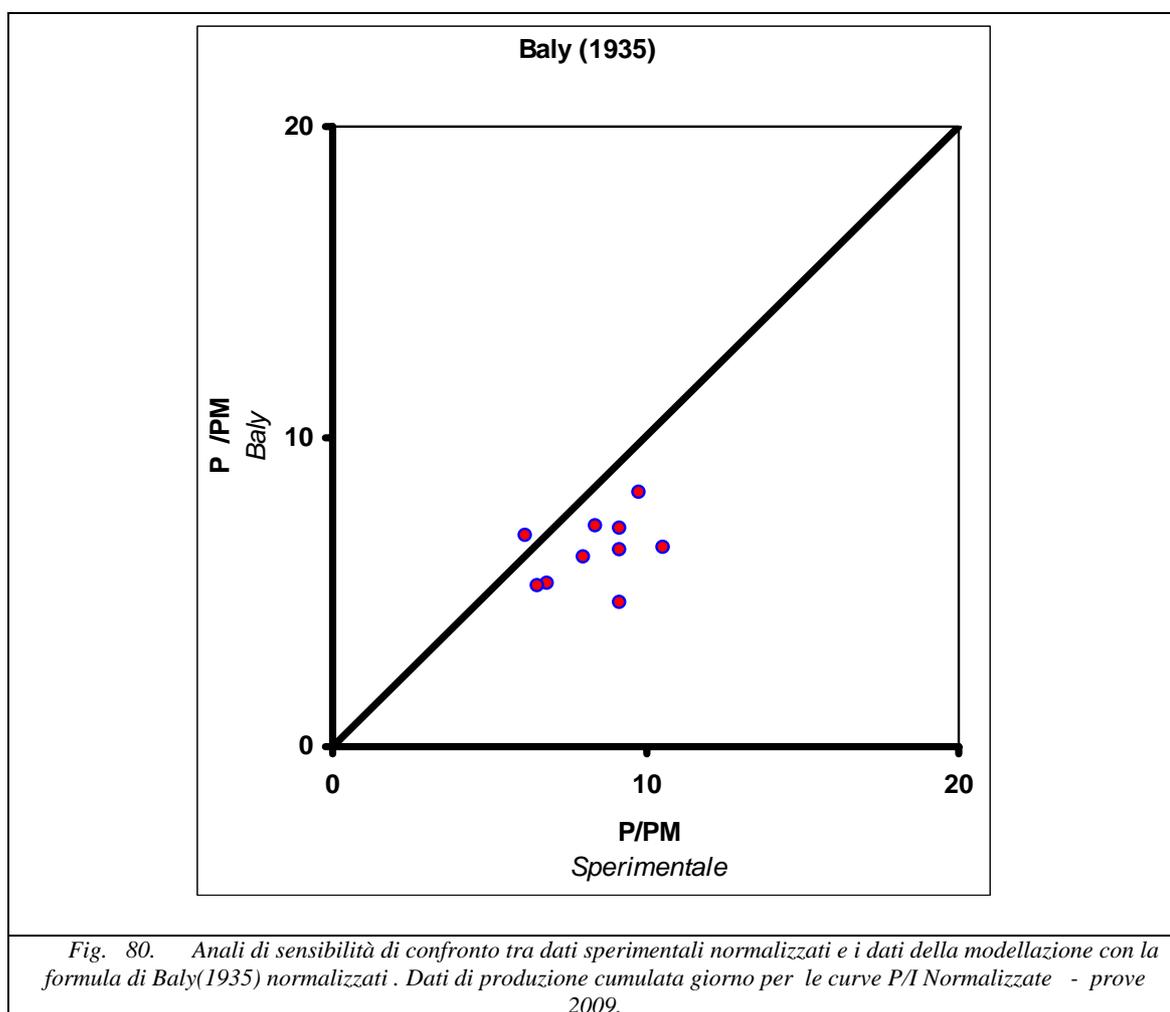
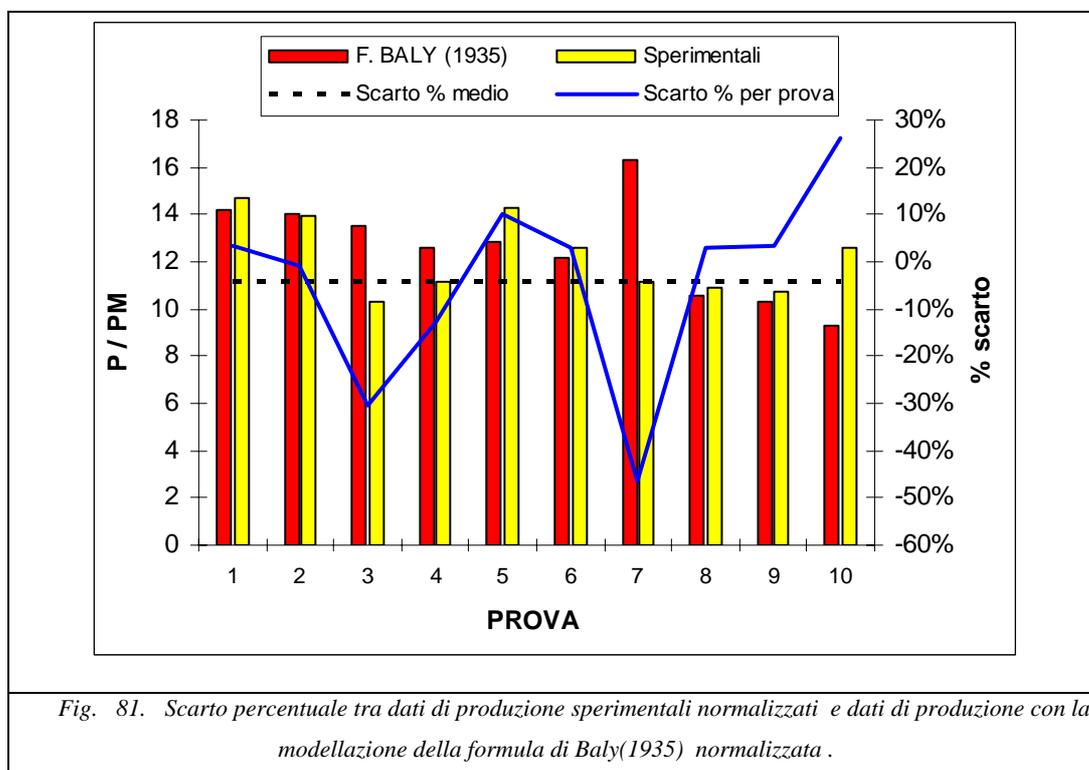


Fig. 80. Anali di sensibilità di confronto tra dati sperimentali normalizzati e i dati della modellazione con la formula di Baly(1935) normalizzati . Dati di produzione cumulata giorno per le curve P/I Normalizzate - prove 2009.

La formula di Baly (1935) sovrastima la produzione di ossigeno disciolto da parte degli autotrofi. Infatti tutti i punti che rappresentano la produzione che realizza la formula di Baly si collocano al di sopra della retta.

Grafico in cui s'illustra: la produzione stimata con il modello , la produzione misurata normalizzata, lo scarto percentuale per ogni prova, lo scarto percentuale medio tra i dati sperimentali e quelli modellati con la formula di Baly (1935) normalizzata.



La formulazione di Baly (1935) dai dati sperimentali ha uno scostamento percentuale medio maggiore del 4 %.

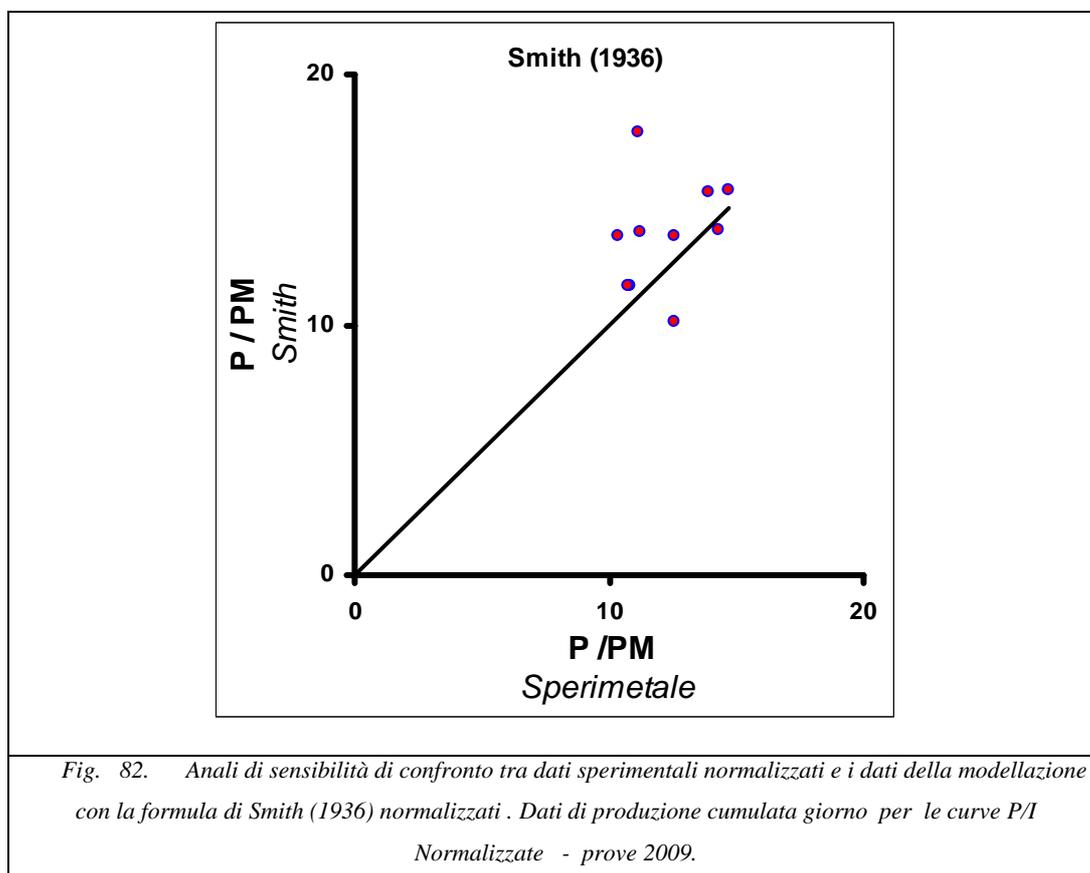
*Analisi dati : (Modello Smith(1936) -Dati sperimentali)*

*produzione cumulata totale giorno*

<b>Dati normalizzati modello di Smith (1936)</b>	
<i>data</i>	<i>P/PM</i>
11-giu	15.37
14-lug	15.33
23-lug	13.52
28-lug	13.67
30-lug	13.76
11-set	13.56
15-set	17.71
7-ott	11.59
1-nov	11.52
20-nov	10.12
<i>media</i>	13.62
<i>min</i>	10.12
<i>max</i>	17.71
<i>dev standard</i>	2.20

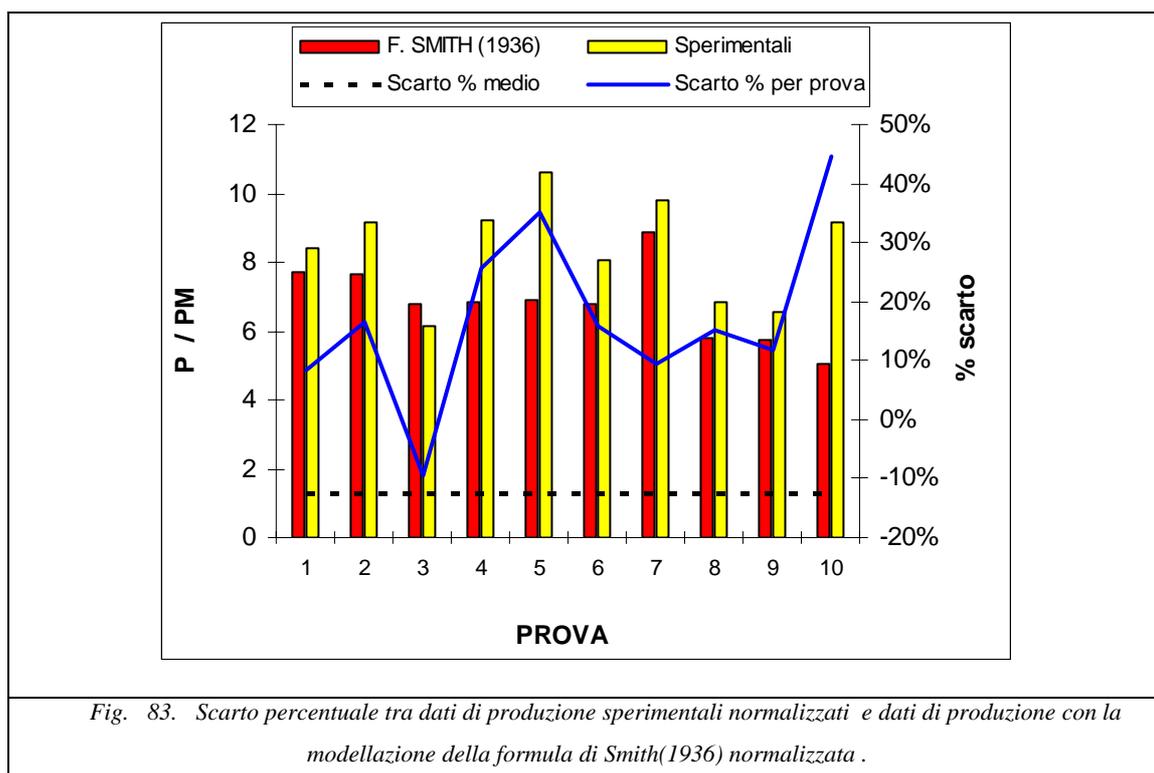
Tab. 29: Prove utili – formula di Smith (1936) dati simulati normalizzati

Grafico in cui s'illustra l'analisi di sensibilità comparativa tra dati sperimentali normalizzati e formula di Smith (1936) normalizzata



La formula di Smith (1936) sovrastima la produzione di ossigeno disciolto da parte degli autotrofi.

Grafico in cui s'illustra: la produzione stimata con il modello , la produzione misurata normalizzata, lo scarto percentuale per ogni prova, lo scarto percentuale medio tra i dati sperimentali e quelli modellati con la formula di Smith (1936).



La formulazione di Smith (1936) dai dati sperimentali ha uno scostamento percentuale medio maggiore del 13 %.

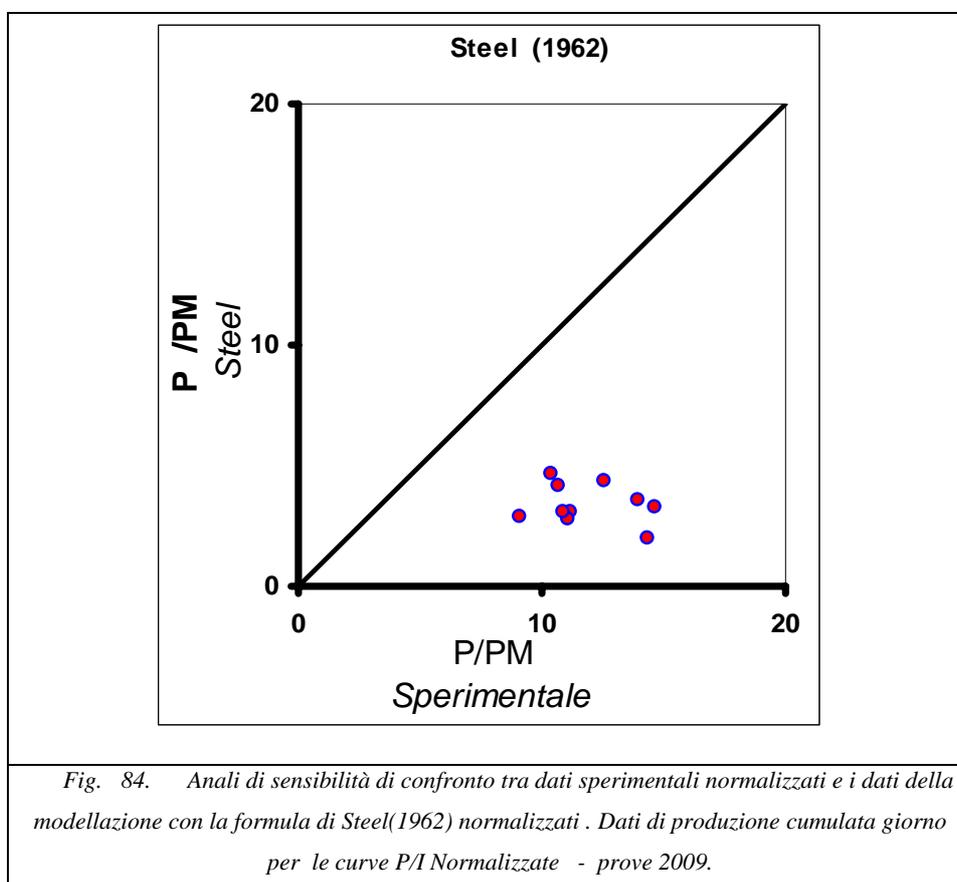
*Analisi dati : (Modello Steel (1962) -Dati sperimentali)*

*produzione cumulata totale giorno*

<b>Dati normalizzati modello di Steel (1962)</b>	
<i>data</i>	<i>P/PM</i>
11-giu	3.23
14-lug	3.53
23-lug	4.65
28-lug	3.02
30-lug	1.94
11-set	4.34
15-set	2.79
7-ott	3.07
1-nov	4.17
20-nov	2.88
<i>media</i>	<b>3.36</b>
<i>min</i>	1.94
<i>max</i>	4.65
<i>dev standard</i>	0.82

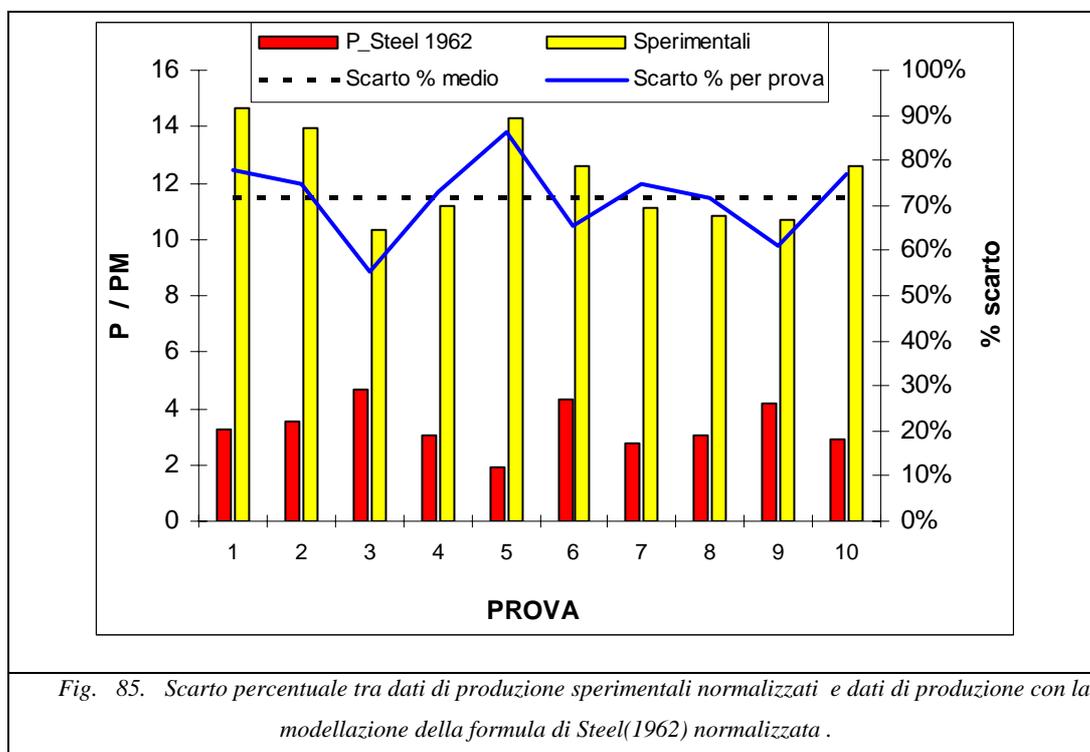
Tab. 30: Prove utili – formula di Steel (1962) dati simulati normalizzati

Grafico in cui s'illustra l'analisi di sensibilità comparativa tra dati sperimentali normalizzati e la formula di Steel (1962) normalizzata



La formula di Steel sottostima la produzione di ossigeno disciolto da parte degli autotrofi.

Grafico in cui s'illustra: la produzione stimata con il modello , la produzione misurata normalizzata, lo scarto percentuale per ogni prova, lo scarto percentuale medio tra i dati sperimentali e quelli modellati con la formula di Steel (1962) normalizzata .



La formulazione di Steel (1962) dai dati sperimentali ha uno scostamento percentuale medio è del 72 %.

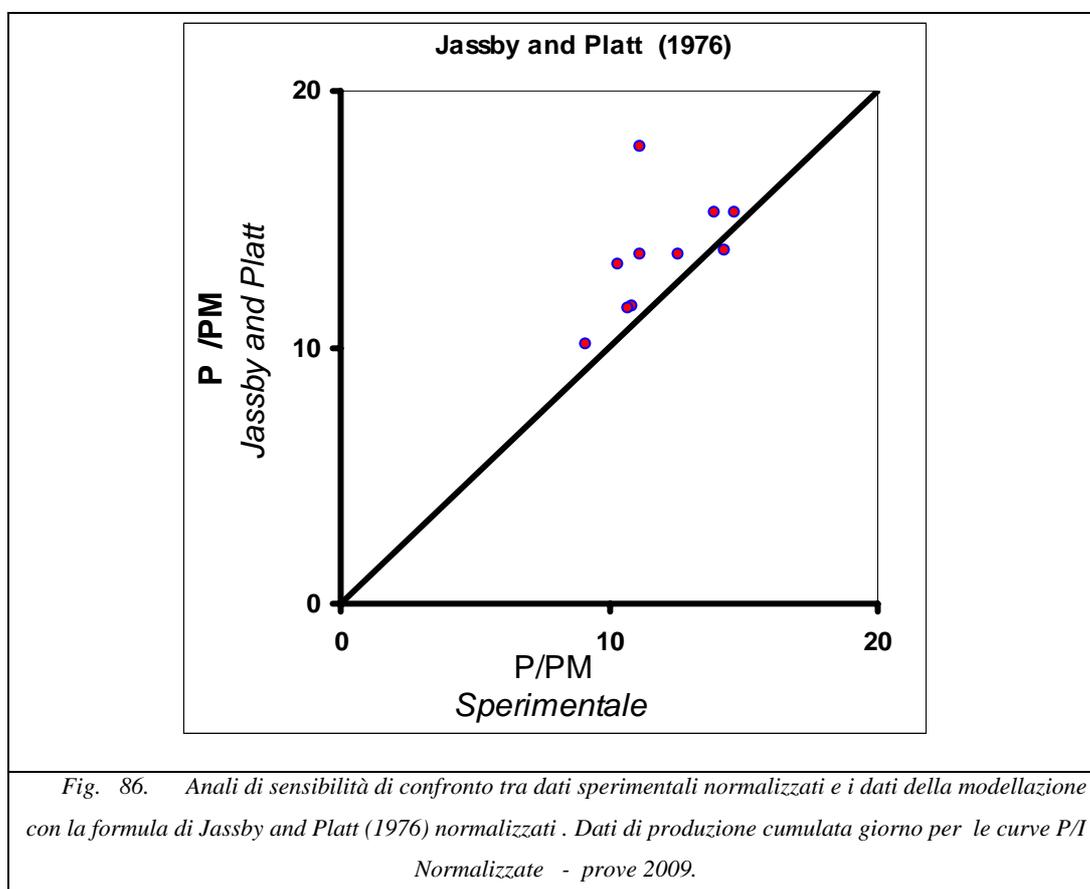
*Analisi dati : (Modello Jassby and Platt(1976) -Dati sperimentali)*

*produzione cumulata totale giorno*

<b>Dati normalizzati modello di Jassby and Platt (1976)</b>	
<i>data</i>	<i>P/PM</i>
11-giu	15.29
14-lug	15.25
23-lug	13.24
28-lug	13.64
30-lug	13.76
11-set	13.58
15-set	17.83
7-ott	11.57
1-nov	11.51
20-nov	10.10
<i>media</i>	<b>13.58</b>
<i>min</i>	10.10
<i>max</i>	17.83
<i>dev standard</i>	2.22

Tab. 31: Prove utili – formula di Jassby and Platt (1976) dati simulati normalizzati

Grafico in cui s'illustra l'analisi di sensibilità comparativa tra dati sperimentali normalizzati e formula di Jassby and Platt (1976) normalizzata



La formula di Jassby and Platt sovrastima la produzione di ossigeno disciolto da parte degli autotrofi.

Grafico in cui si illustra: la produzione stimata con il modello , la produzione misurata normalizzata, lo scarto percentuale per ogni prova, lo scarto percentuale medio tra i dati sperimentali e quelli modellati con la formula di Jassby and Platt (1976).

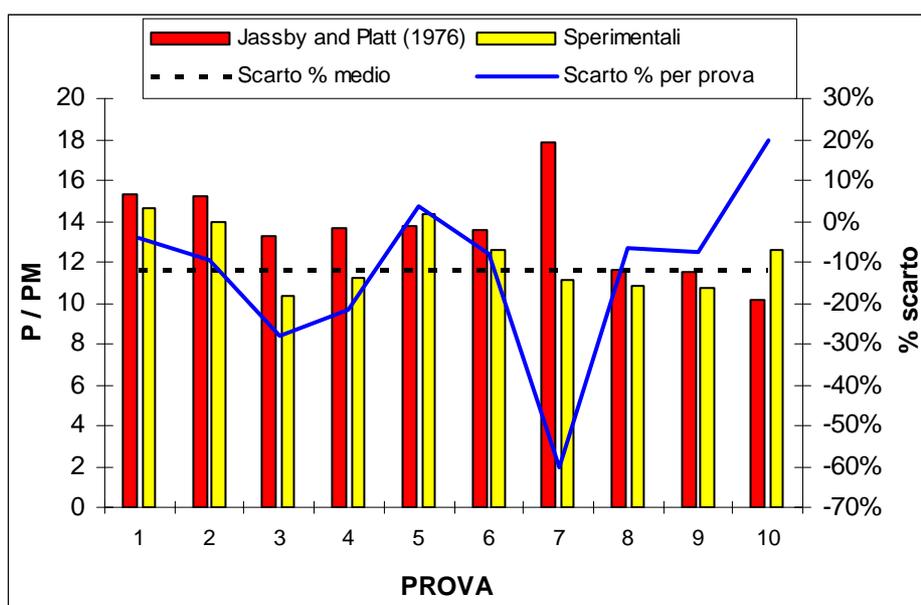


Fig. 87. Scarto percentuale tra dati di produzione sperimentali normalizzati e dati di produzione con la modellazione della formula di Jassby and Platt (1976) normalizzata .

La formulazione di Jassby and Platt (1976) dai dati sperimentali ha uno scostamento percentuale maggiore del 12 %.

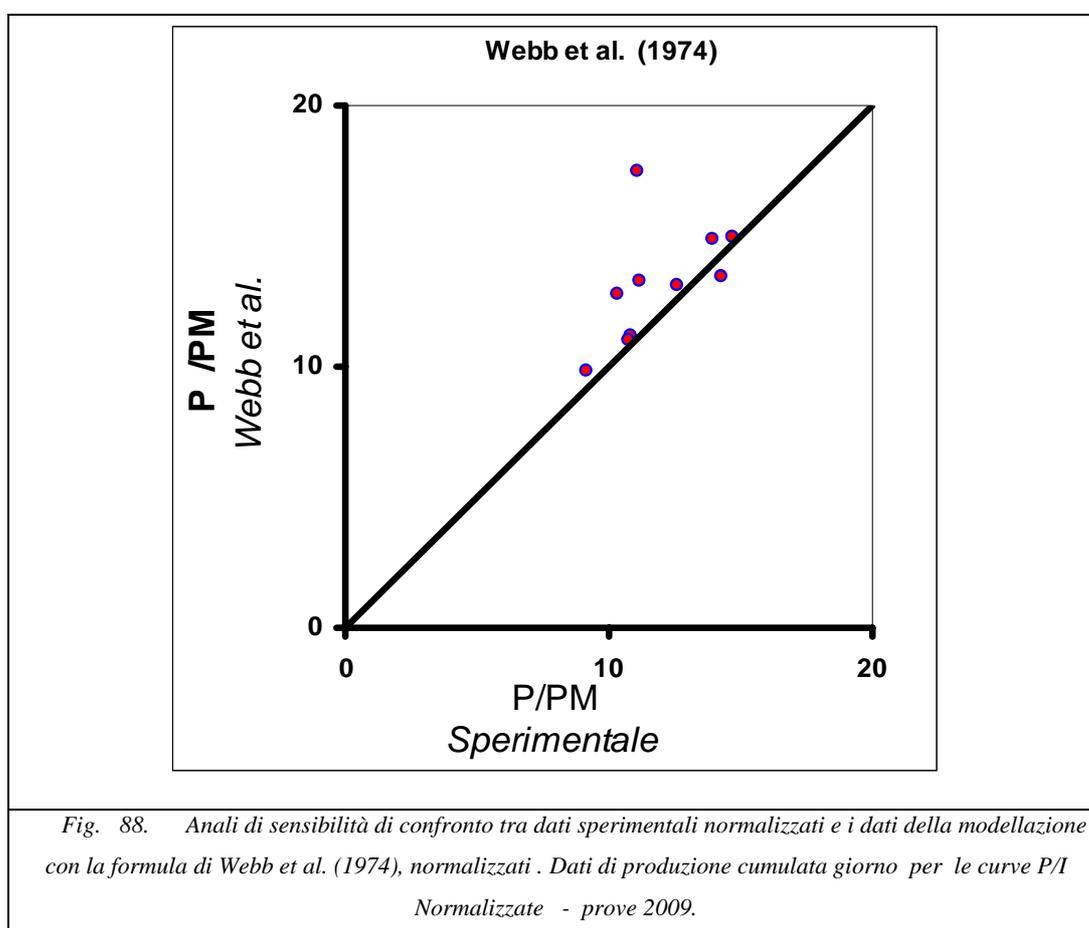
*Analisi dati : (Modello Webb et al.(1974) -Dati sperimentali)*

*produzione cumulata totale giorno*

<b>Dati normalizzati modello di Webb et al. (1974)</b>	
<i>data</i>	<i>P/PM</i>
11-giu	14.94
14-lug	14.87
23-lug	12.74
28-lug	13.29
30-lug	13.45
11-set	13.10
15-set	17.49
7-ott	11.21
1-nov	11.04
20-nov	9.80
<i>media</i>	<b>13.19</b>
<i>min</i>	9.80
<i>max</i>	17.49
<i>dev standard</i>	2.23

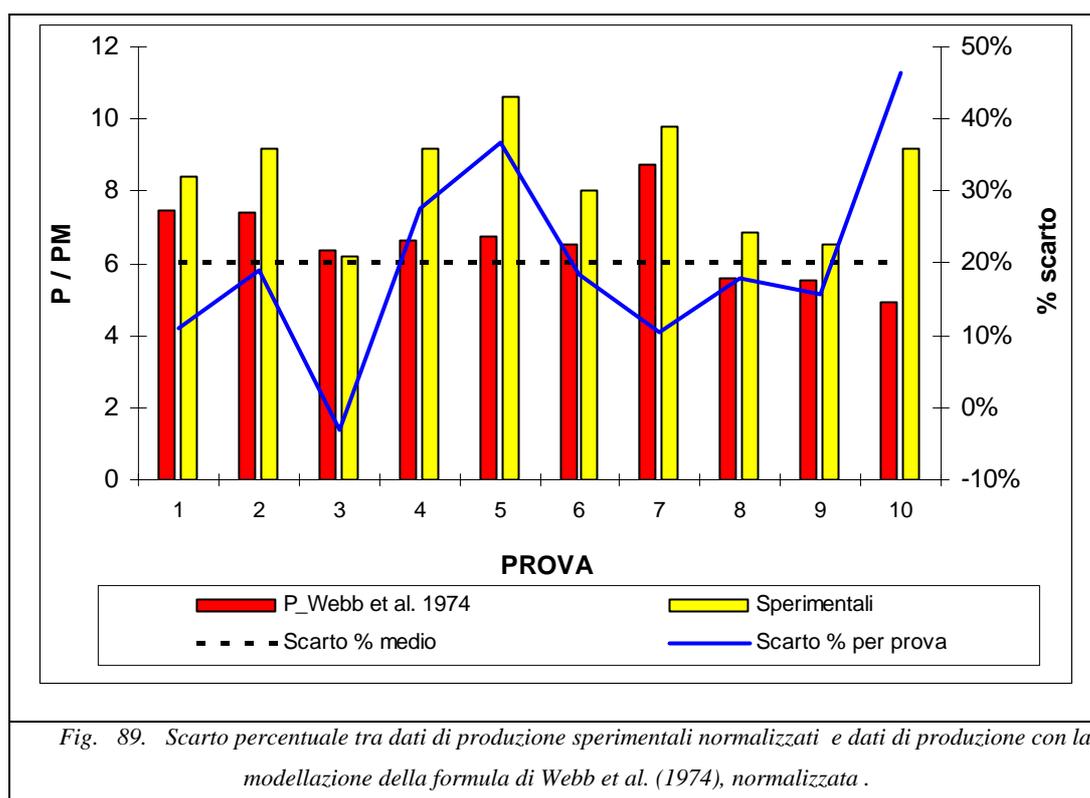
Tab. 32: Prove utili – formula di Webb et al. (1974) dati simulati normalizzati

Grafico in cui s'illustra l'analisi di sensibilità comparativa tra dati sperimentali normalizzati e formula di Webb et al. (1974) normalizzata



La formula di Webb et al. (1974), sovrastima la produzione di ossigeno disciolto da parte degli autotrofi.

Grafico in cui s'illustra: la produzione stimata con il modello , la produzione misurata normalizzata, lo scarto percentuale per ogni prova, lo scarto percentuale medio tra i dati sperimentali e quelli modellati con la formula di Webb et al. (1974).



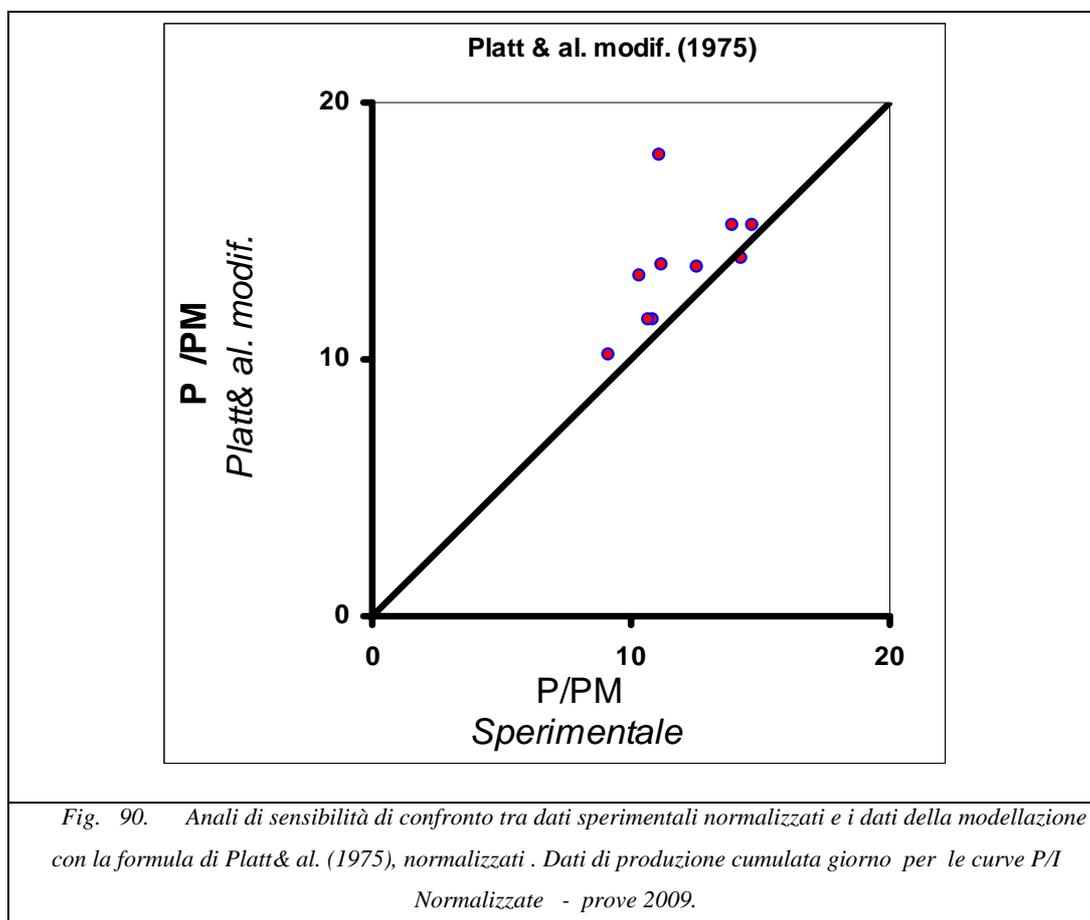
La formulazione di Webb et al.(1974) dai dati sperimentali ha uno scostamento percentuale medio maggiore del 9 %.

*Analisi dati : (Modello Platt et al. (1975)-Dati sperimentali)*

*produzione cumulata totale giorno*

<b>Dati normalizzati modello di Platt et al. (1975)</b>	
<i>data</i>	<i>P/PM</i>
11-giu	15.25
14-lug	15.23
23-lug	13.25
28-lug	13.64
30-lug	13.93
11-set	13.59
15-set	17.92
7-ott	11.56
1-nov	11.52
20-nov	10.17
<b><i>media</i></b>	<b>13.61</b>
<i>min</i>	10.17
<i>max</i>	17.92
<i>dev standard</i>	2.22

Grafico in cui s'illustra l'analisi di sensibilità comparativa tra dati sperimentali normalizzati e formula di Platt & al. (1975) normalizzata



La formula di Platt & al. (1975), sovrastima la produzione di ossigeno disciolto da parte degli autotrofi.

Grafico in cui s'illustra: la produzione stimata con il modello , la produzione misurata normalizzata, lo scarto percentuale per ogni prova, lo scarto percentuale medio tra i dati sperimentali e quelli modellati con la formula di Platt & al. (1975)

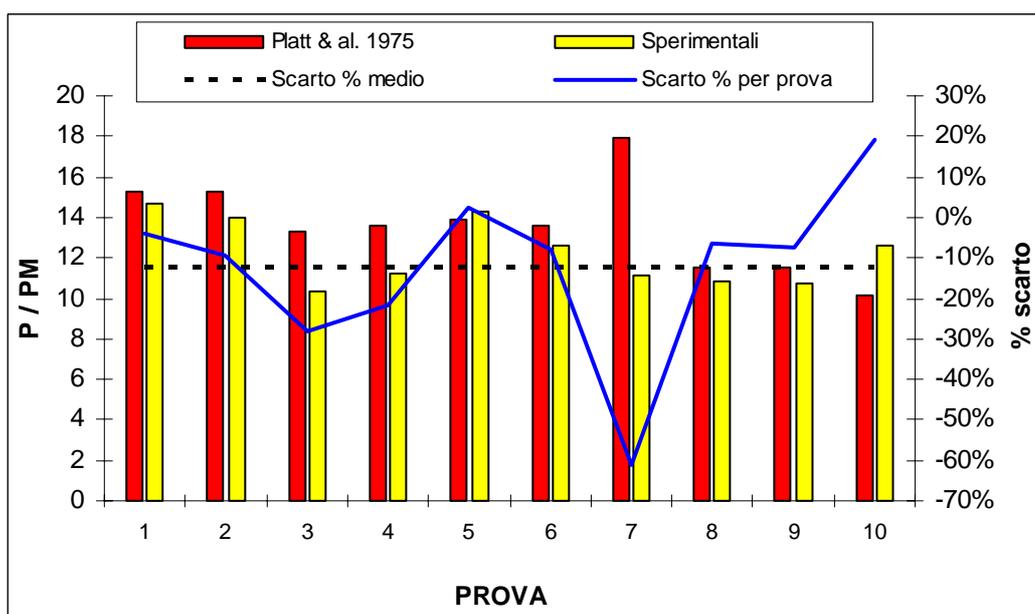


Fig. 91. Scarto percentuale tra dati di produzione sperimentali normalizzati e dati di produzione con la modellazione della formula di Platt & al. (1975), normalizzata .

La formulazione di Platt & al. (1975) dai dati sperimentali ha uno scostamento percentuale medio maggiore del 12 %.

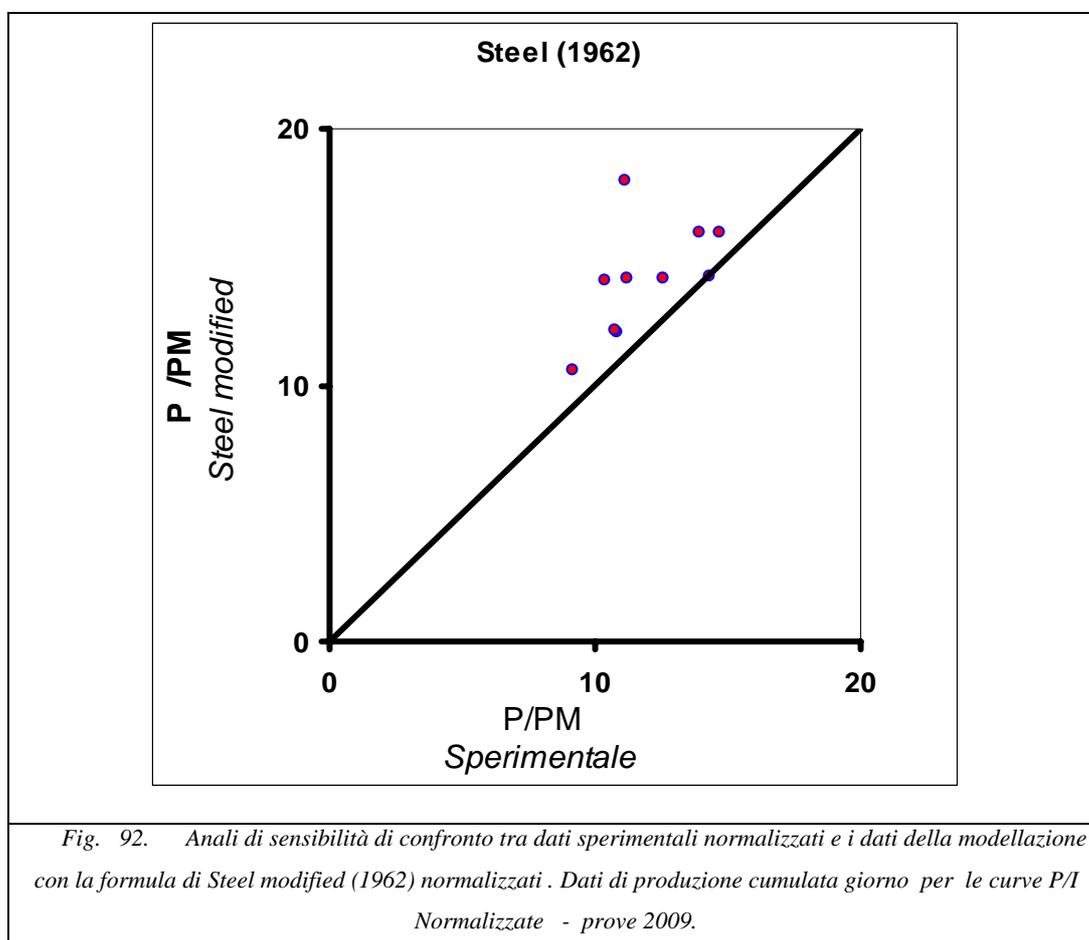
*Analisi dati : (Modello Steel modified. (1962) -Dati sperimentali)*

*produzione cumulata totale giorno*

<b>Dati normalizzati modello di Steel modified (1962)</b>	
<i>data</i>	<i>P/PM</i>
11-giu	15.99
14-lug	15.97
23-lug	14.09
28-lug	14.17
30-lug	14.20
11-set	14.17
15-set	18.00
7-ott	12.06
1-nov	12.14
20-nov	10.61
<i>media</i>	<b>14.14</b>
<i>min</i>	10.61
<i>max</i>	18.00
<i>dev standard</i>	2.17

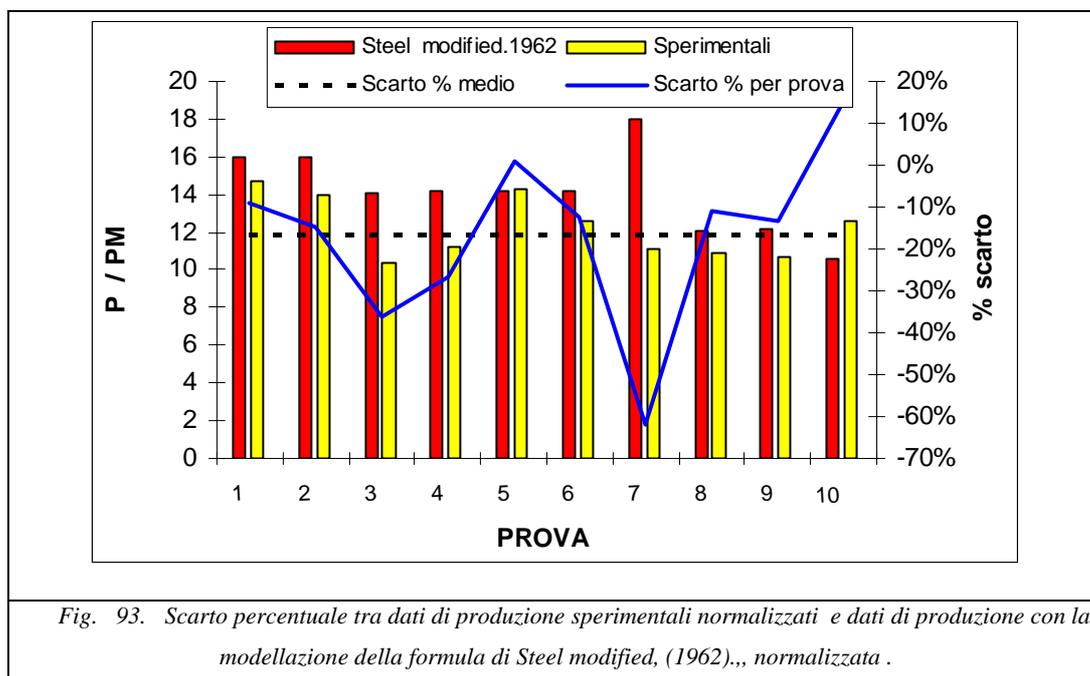
Tab. 33: Prove utili – formula di Steel modified (1962) dati simulati normalizzati

Grafico in cui s'illustra l'analisi di sensibilità comparativa tra dati sperimentali normalizzati e formula di Steel modified (1962) normalizzata



La formula di Steel (1962), sovrastima la produzione di ossigeno disciolto da parte degli autotrofi.

Grafico in cui s'illustra: la produzione stimata con il modello , la produzione misurata normalizzata, lo scarto percentuale per ogni prova, lo scarto percentuale medio tra i dati sperimentali e quelli modellati con la formula di Steel modified. (1962) normalizzata.



La formulazione di Steel(1962), dai dati sperimentali ha uno scostamento percentuale medio maggiore del 17 %.

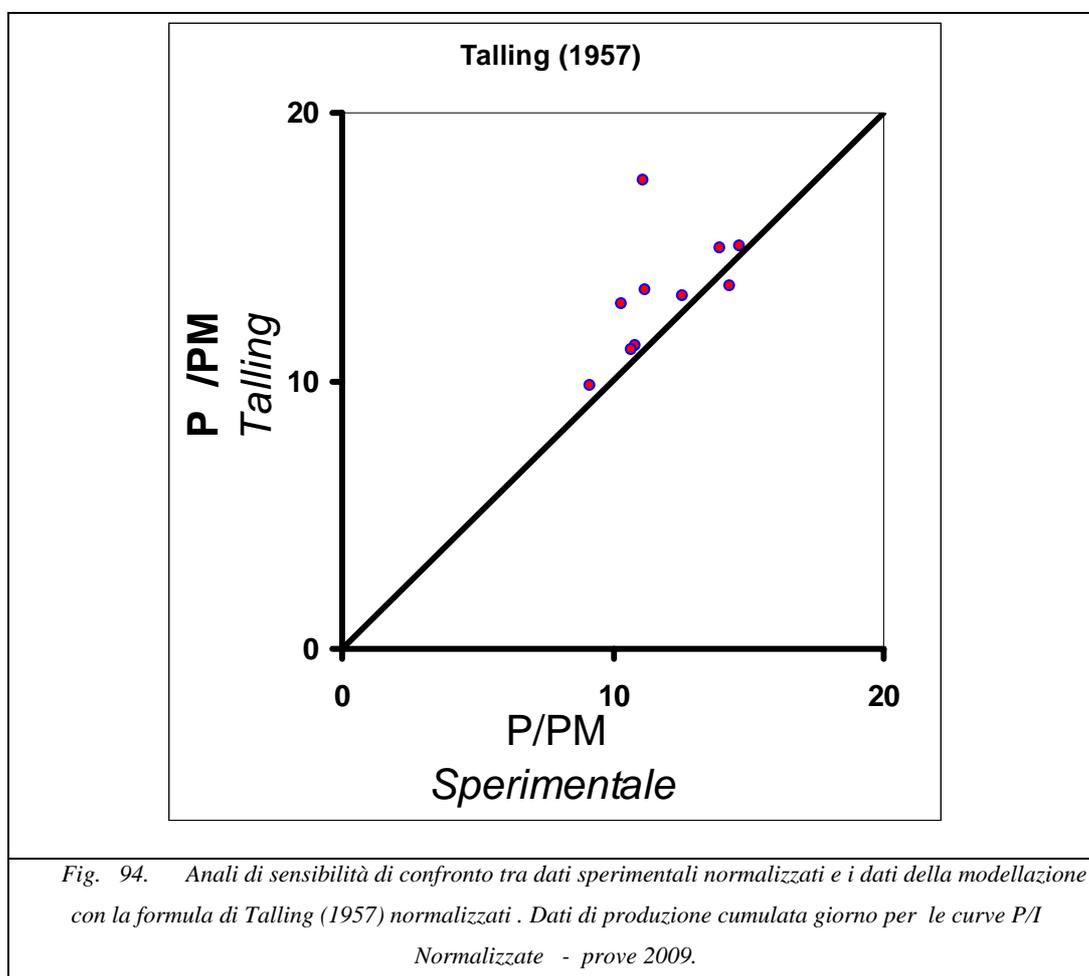
*Analisi dati : (Modello Talling (1957) -Dati sperimentali)*

*produzione cumulata totale giorno*

<b>Dati normalizzati modello di Talling (1957)</b>	
<i>data</i>	<i>P/PM</i>
11-giu	15.00
14-lug	14.93
23-lug	12.83
28-lug	13.35
30-lug	13.51
11-set	13.15
15-set	17.46
7-ott	11.27
1-nov	11.12
20-nov	9.83
<i>media</i>	<b>13.25</b>
<i>min</i>	9.83
<i>max</i>	17.46
<i>dev standard</i>	2.21

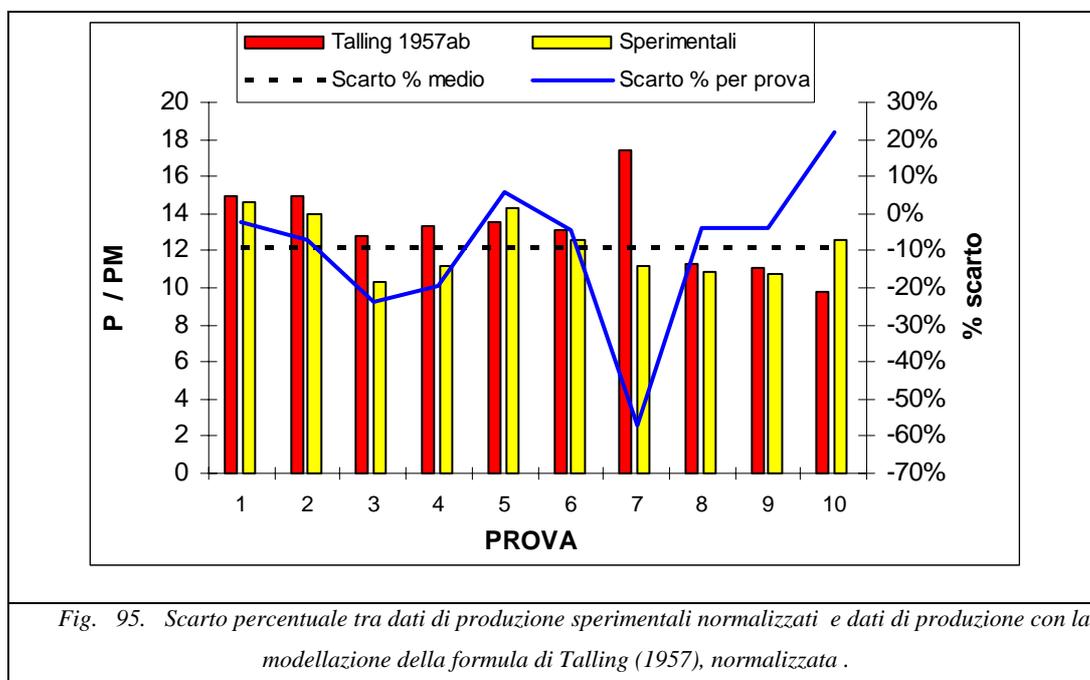
Tab. 34: Prove utili – formula di Talling (1957) dati simulati normalizzati

Grafico in cui s'illustra l'analisi di sensibilità comparativa tra dati sperimentali normalizzati e la formula di Talling (1957) normalizzata



La formula di Talling (1957), sovrastima la produzione di ossigeno disciolto da parte degli autotrofi.

Grafico in cui s'illustra: la produzione stimata con il modello , la produzione misurata normalizzata, lo scarto percentuale per ogni prova, lo scarto percentuale medio tra i dati sperimentali e quelli modellati con la formula di Talling (1957) normalizzata



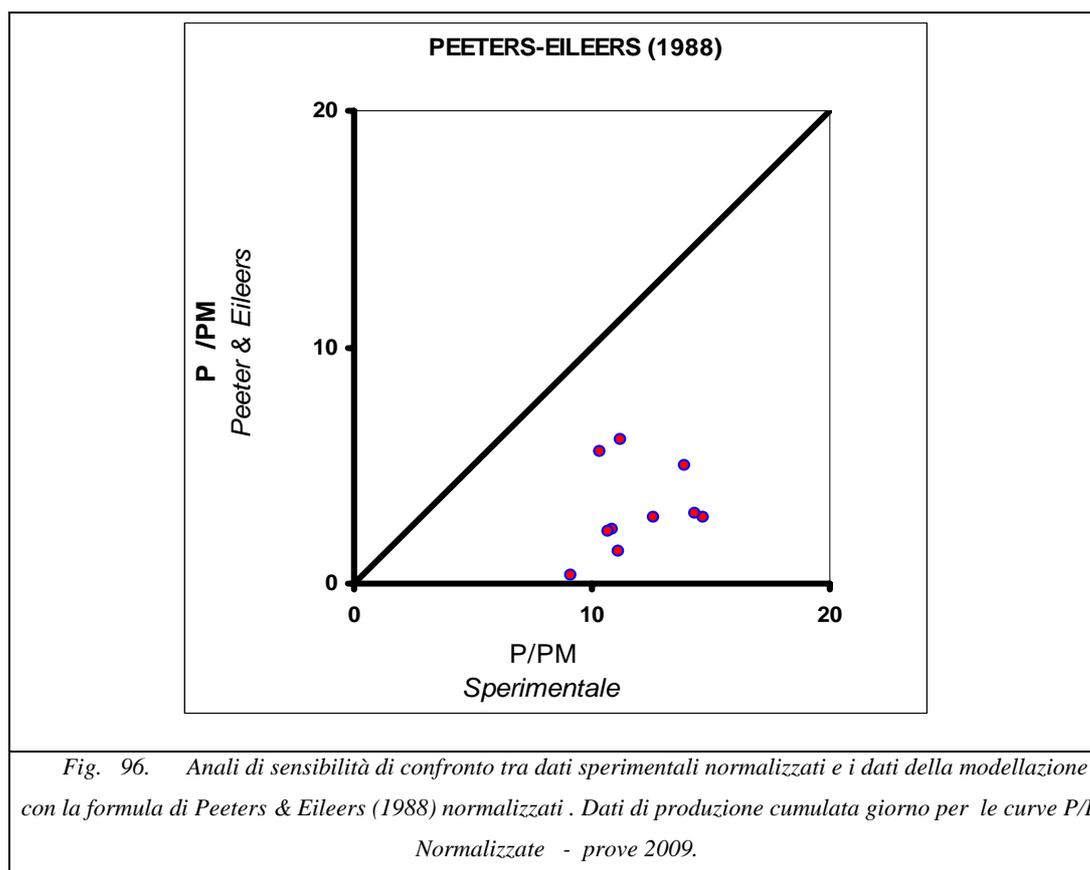
La formulazione di Talling (1957), dai dati sperimentali ha uno scostamento percentuale medio maggiore del 9 %.

*Analisi dati : (Modello Peeters & Eileers (1988) -Dati sperimentali-  
produzione cumulata totale giorno*

<b>Dati normalizzati modello di Peeters &amp; Eileers (1988)</b>	
<i>data</i>	<i>P/PM</i>
11-giu	2.78
14-lug	4.98
23-lug	5.61
28-lug	6.08
30-lug	2.96
11-set	2.82
15-set	1.35
7-ott	2.30
1-nov	2.19
20-nov	0.38
<b><i>media</i></b>	<b>3.14</b>
<i>min</i>	0.38
<i>max</i>	6.08
<i>dev standard</i>	1.85

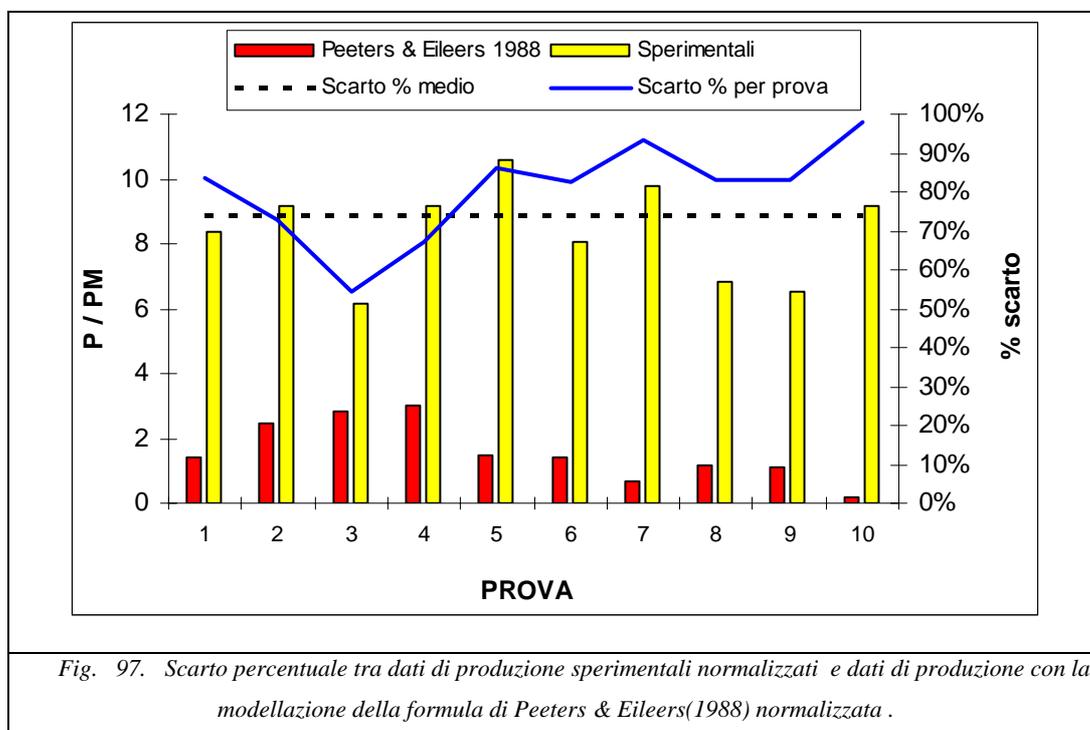
Tab. 35: Prove utili – formula di Peeters & Eileers(1988) dati simulati normalizzati

Grafico in cui s'illustra l'analisi di sensibilità comparativa tra dati sperimentali normalizzati e formula di Peeters & Eileers(1988) normalizzata



La formula di Peeters & Eileers (1988), sottostima la produzione di ossigeno disciolto da parte degli autotrofi.

Grafico in cui si illustra: la produzione stimata con il modello , la produzione misurata normalizzata, lo scarto percentuale per ogni prova, lo scarto percentuale medio tra i dati sperimentali e quelli modellati con la formula di Peeters & Eileers (1988) normalizzata



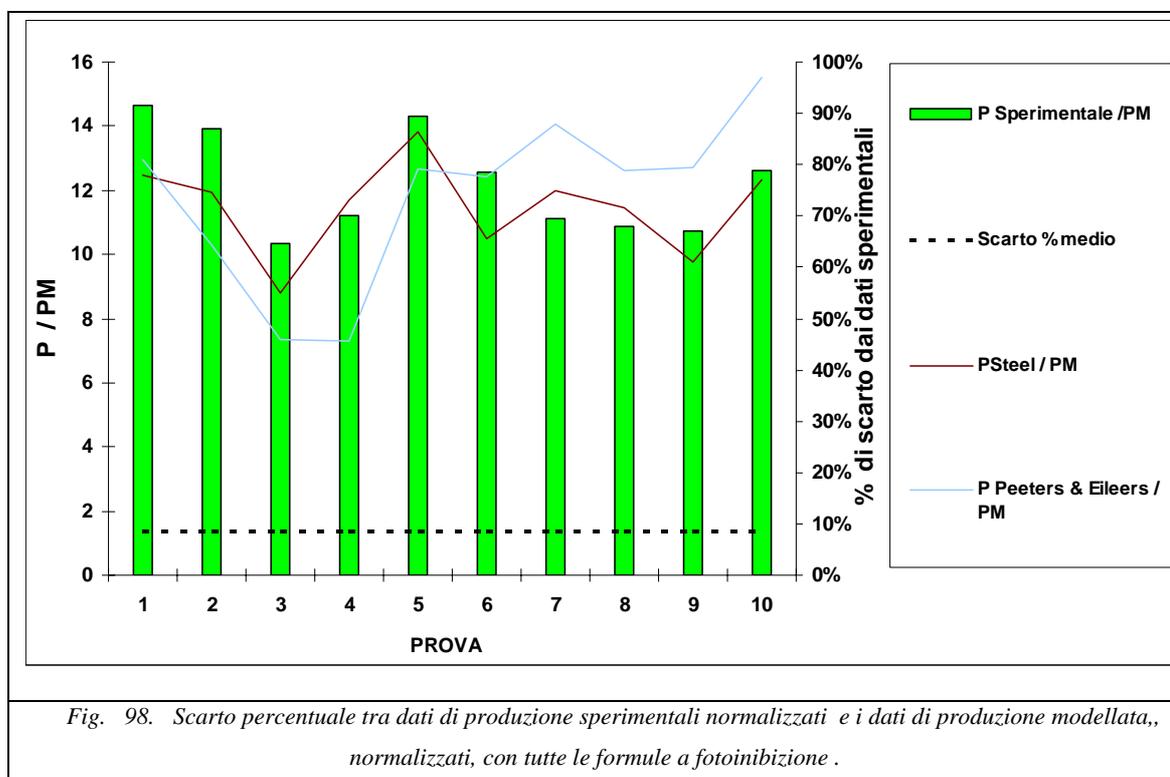
La formulazione di Peeters & Eileers (1988), dai dati sperimentali ha uno scostamento percentuale medio è del 74 %.

*Analisi dati : modelli -Dati sperimentali*

*produzione cumulata totale giorno*

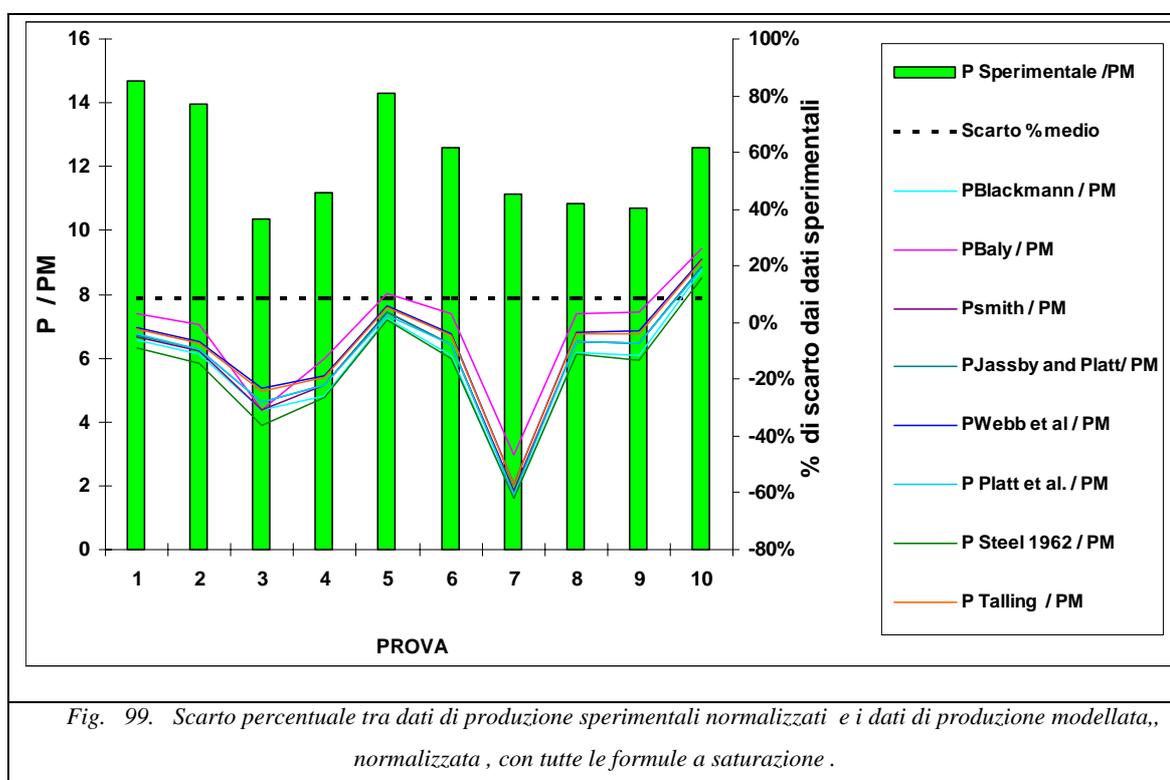
Una ulteriore analisi può essere ottenuta mettendo insieme in un solo grafico tutte le formule e gli scarti dalla produzione sperimentale corrispondenti.

Nel grafico seguente sono riportate solo le formule a fotoinibizione modellate



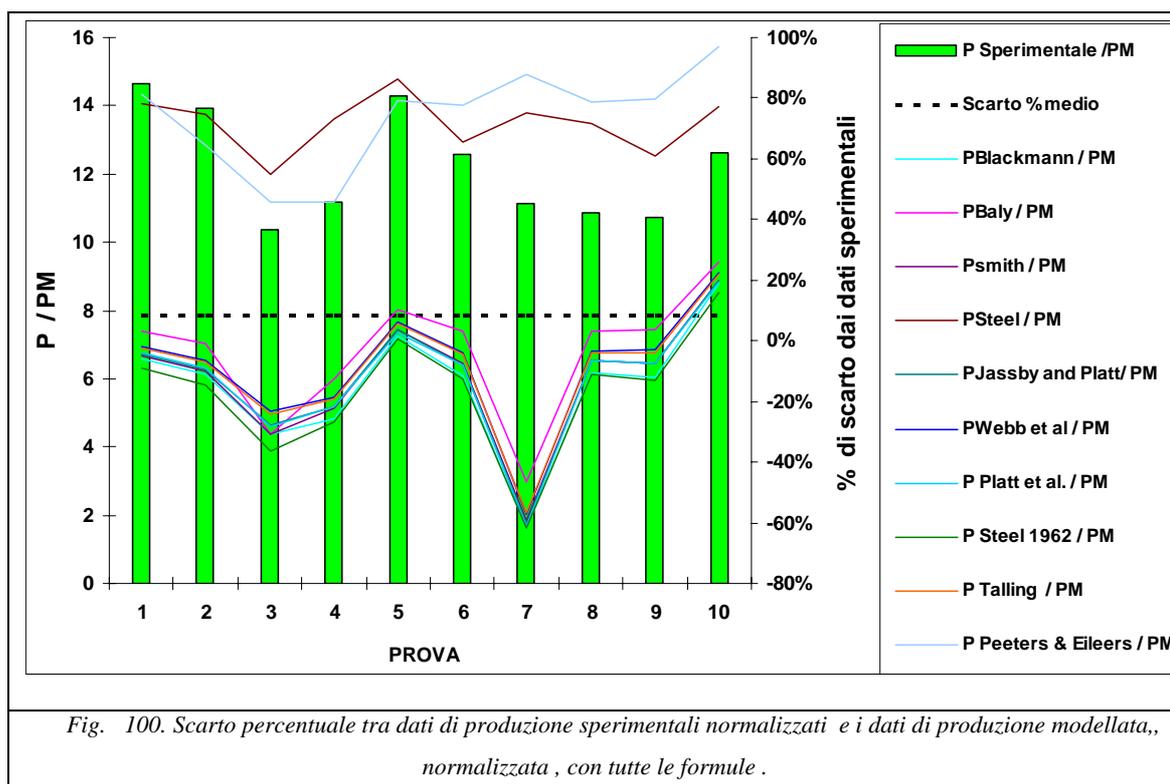
*produzione cumulata totale giorno*

Nel grafico seguente sono riportate solo le formule a saturazione modellate



*produzione cumulata totale giorno*

Nel grafico seguente sono riportate tutte le formule modellate



Lo scostamento percentuale medio percentuale tra la produzione misurata e quella modellata è del 8 %. Il migliore risultato lo fornisce la formula di Baly (1935), con uno scarto medio percentuale del 4 %.

#### 4.5 PARTE 1° - sperimentazione fiume Busento - alghe filamentose

##### 1° CAMPIONAMENTO: SETT-OTT 2008

Solo per la prima campagna di esperimenti effettuati l'analisi dei dati si riferisce a prove che hanno una durata di poche ore. Per poter effettuare le prove, il lavoro inizia molto tempo prima, come già detto, con la posa delle piastrelle sul fondo del fiume in maggio. Le piastrelle sono poi prelevate quando su di esse le alghe hanno raggiunto il massimo sviluppo, è stato così possibile calcolare la massa biologica vegetale, sull'unità di superficie, dopo aver messo in stufa per 24 ore a 115°C le stesse. Si riportano in tabella la produzione media oraria di ossigeno delle alghe filamentose.

<i>Data prova</i>	<i>Durata prova</i> ( h )	<i>peso secco alga</i> ( g alga )	<i>Concentr. O<sub>2</sub> finale</i> ( mg O <sub>2</sub> /l )	<i>consumo O<sub>2</sub> batteri</i> ( mg O <sub>2</sub> /l )	<i>Concentr. netta O<sub>2</sub></i> ( mg O <sub>2</sub> /l )	<i>velocità produzione O<sub>2</sub></i> ( mg O <sub>2</sub> /h )	<i>velocità produzione specifica O<sub>2</sub></i> ( mg O <sub>2</sub> /h g alga )	<i>produzione O<sub>2</sub> per m<sup>2</sup> h</i> ( mg O <sub>2</sub> /g alga·h·m <sup>2</sup> )
23/9/08	3.72	3.43	6.67	0.279	6.95	16.92	4.93	1721.58
26/9/08	4.16	2.54	5.75	0.312	6.06	13.19	5.20	1815.65
8/10/08	3.20	3.23	7.13	0.240	7.37	20.84	6.46	2255.35
10/10/08	3.22	4.26	7.29	0.241	7.53	21.19	4.97	1736.15
15/10/08	2.72	4.12	7.59	0.204	7.79	25.96	6.31	2203.42
<b>MEDIA</b>								<b>1946.43</b>

Tab. 36: Prove 2008 alghe filamentose fiume Busento

## **2° CAMPIONAMENTO: AGO-OTT 2009**

Per la 2° campagna di sperimentazione sul fiume Busento, si era deciso di aumentare il numero delle piastrelle estendendo la ricerca lungo il tratto cittadino del fiume Busento, fino ad arrivare alla confluenza con il fiume Crati.

La raccolta delle piastrelle ha purtroppo non ha dato gli esiti sperati, in quanto per sia per i lavori del parco fluviale sia e per altre cause di natura esterna non si è potuti raccogliere un numero sufficiente di piastrelle. Ne erano state posate circa 20 nei due punti scelti per la ricerca, di tutte le piastrelle ne sono state recuperate solo due. Con le due piastrelle ricoperte di alghe sono state prodotte due prove di produzione di ossigeno fotosintetico, e dall'analisi dei dati derivati dalle prove solo una prova di produzione è risultata buona.

Della prova valida si riporta, a solo titolo indicativo dell'ossigeno prodotto dalle alghe filamentose, il valore di produzione netta misurata  $P_n=4,13$  [(mgO<sub>2</sub>/l) / ((g SS) \*d)].

## CAPITOLO 5. CONCLUSIONI

Nella modellazione della qualità fluviale, l'apporto al contenuto di ossigeno disciolto dato dalla produzione fotosintetica degli autotrofi acquatici, è un fattore significativo e da non trascurare, essa compare nei modelli matematici quali-quantitativi che descrivono la cinetica dell'ossigeno in un fiume come bilancio di massa.

Grazie alla costruzione dello strumento già descritto, è stata messa a punto una metodologia per la misura della produzione dell'ossigeno fotosintetico, detta produzione aumenta al diminuire del fotoperiodo; infatti, si è potuto osservare, che la produzione netta dell'ossigeno raggiunge il suo massimo a novembre. Tale evidenza sperimentale è dovuta all'instaurarsi di fenomeni di fotoinibizione.

Sono stati misurati :

*la produzione fotosintetica netta  $P_n$ , i cui valori variano: da un minimo di  $0,103[(\text{mgO}_2/\text{l})/((\text{mgSS}/\text{l})\cdot\text{d})]$ , che si verifica a giugno ad un massimo di  $2,268[(\text{mgO}_2/\text{l})/((\text{mgSS}/\text{l})\cdot\text{d})]$  a novembre, con un valore medio di  $0,560[(\text{mgO}_2/\text{l})/((\text{mgSS}/\text{l})\cdot\text{d})]$ .*

la produzione massima oraria  $P_{mas}$ , i cui valori variano : da un minimo di 0,014 [(mgO<sub>2</sub>/l)/((mgSS/l)\*h)] ad un massimo di 0,327 [(mgO<sub>2</sub>/l)/((mgSS/l)\*h)], con un valore medio di 0,065 [(mgO<sub>2</sub>/l)/((mgSS/l) \*h)].

la produzione oraria  $Ph_{12}$ , alle ore 12:00, i cui valori variano: da un minimo di 0,007[(mgO<sub>2</sub>/l)/((mgSS/l)\*h)]; ad un massimo di 0,187[(mgO<sub>2</sub>/l)/((mgSS/l)\*h)]; con un valore medio di 0,052[(mgO<sub>2</sub>/l)/((mgSS/l) \*h)].

Sono state costruite le curve di produzione dell'ossigeno disciolto in funzione della radiazione, curve luce/fotosintesi (P/I).

Dall'analisi di dette curve, si evince che la fotosintesi raggiunge il massimo nella prima parte di insolazione e quindi non corrispondente al mezzogiorno astronomico, come generalmente indicato in numerosi sperimentali in letteratura, seguita da un andamento decrescente successivo, quindi un rallentamento dell'attività fotosintetica, indice dell'instaurarsi di una inibizione della fotosintesi.

Le curve luce/fotosintesi, hanno permesso di determinare alcuni parametri caratteristici della fotosintesi, e di interpretare l'efficienza fotosintetica (ossia l'assimilazione per unità massa per unità di radiazione nell'unità di tempo), l'intensità luminosa ottimale e quella saturante; in particolare sono stati determinati :

$\alpha$  (pendenza iniziale della curva luce-fotosintesi), che varia tra il valore minimo di 0,0001[(mgO<sub>2</sub>/l)/((mgSS/l)\*h)]/[watt/m<sup>2</sup>]; e il valore massimo 0,0025[(mgO<sub>2</sub>/l)/((mgSS/l)\*h)]/[watt/m<sup>2</sup>], con un valore medio di 0,0008[(mgO<sub>2</sub>/l)/((mgSS/l)\*h)]/[watt/m<sup>2</sup>];

$I_s$  (radiazione saturante) che varia tra il valore minimo di 76 [watt/m<sup>2</sup>]; e il valore massimo 152 [watt/m<sup>2</sup>], con un valore medio di 108 [watt/m<sup>2</sup>];

E' stata eseguita una analisi di sensibilità di alcuni modelli più utilizzati. L'analisi di sensibilità è stata effettuata una volta con i dati della produzione cumulata alle ore 12:00, si è potuto constatare, che le formule in letteratura sottostimano la produzione di ossigeno da parte degli autotrofi acquatici indagati. Lo scarto medio percentuale tra la produzione misurata e quella modellata è del 30,4 %. Il migliore risultato lo fornisce la formula di Steel con una percentuale di scarto del 14,1 %.

Una seconda analisi di sensibilità è stata eseguita con la produzione cumulata dell'intera giornata nell'ipotesi di simmetria tra la produzione antimeridiana e pomeridiana. Da detta analisi si rileva che le formule in letteratura sovrastimano i dati sperimentali, con uno scarto medio dell'8 %, la migliore formula risulta quella di Baly con uno scarto del 4%

Le formule analizzate presuppongono la simmetria tra la produzione ante meridiana e pomeridiana.

I dati sperimentali hanno messo in luce che non esiste una stretta simmetria.

Gli sviluppi futuri della ricerca saranno indirizzati ad indagare sull'esistenza di una relazione che possa tenere in conto della fotoinibizione, della dissimetria riscontrata in modo da poter essere utilizzata anche in modelli in cui si richiede un'analisi per frazioni di giorni.

## **BIBLIOGRAFIA**

AA.VV., 1983. *Impatto degli impianti con sistema di raffreddamento a ciclo aperto sugli ecosistemi fluviali*. CNR AQ/2/25. Roma.

Aalderink\_R.H. and R.Jovin 1997. *Estimation of the photosynthesis/irradiance (P/I) curve parameters from light and dark bottle experiments*. Journal of Plankton Research Vol.19 no.11 pp.1713-1742

AA.VV. 1956 . *Fisiologia Vegetale*, Edagricole

APHA, AWWA e WEF.1998. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. XX Ed., (Washington, APHA).

Azzellino A., Vismara, *La protezione dei corpi idrici recettori delle acque reflue*. IA Ingegneria Ambientale Vol.XXXVI n.3, marzo 2007

Baly.E.C.C. 1935 *The kinetics of photosynthesis*. Proc. R. Soc. London Sen B, 117, 218-239.

Blackman F.F. 1905 *Optima and limiting factors*. Ann. Bot., 19, 281-295

Bowie G.L., Mills W.B. et al. *Rates, Constants and Kinetics Formulation in Surface Water-Quality Modelling*. In U.S. Environmental Protection Agency, ORD, Athens, GA, ERL, EPA/600/3-85/040, 1985

Brown L.C. e Barnwell T.O. 1987. *The enhanced stream water quality models QUAL2E-UNCAS*, EPA/600/3-87/007, (Athens, Ga., Environmental Research Laboratory)

Chapra, S.C., and McBride, G.B. (2005). *Rapid calculation of oxygen in streams: Approximate delta method*. J. Environ. Eng., 131(3), 336-342.

Chapra, S.C., and Di Toro, D.M. (1991). *Delta Method for Estimating Primary Production, Respiration, and Reaeration in Streams*. J. Environ. Eng., 117(5), 640-655.

Chapra, S.C. and Pelletier, G.J. 2003. *QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality: Documentation and Users Manual*. Civil and Environmental Engineering Dept., Tufts University, Medford

Eilers P.H.C. and Peeters J.C.H. 1988 *A model for the relationship between light intensity and the rate of photosynthesis in phytoplankton*. *Ecol Model*, 42, 199-215.

Frenette. 1993. *Lack of agreement among models for estimating the photosynthetic parameters*. *Limnol. Oceanogr.*, 38(3), 679-687.

Frega G. e Infusino E. 1992. *Inquinamento diffuso e puntuale in un sottobacino del Crati influenzato dalla presenza di un invaso*. Atti del 12° Corso di Aggiornamento in Tecniche per la Difesa dall'Inquinamento. Editoriale Bios, 9-33

Frega G., Infusino E. e Macchione F., 1994. *Compatibilità di opere di derivazione e di regolazione della portata di un fiume sulla qualità delle acque*. Atti del 15° Corso di Aggiornamento in Tecniche per la Difesa dall'Inquinamento. Editoriale Bios, 331-353

Graham B Mc Bride. 1992. *Simple calculation of daily photosynthesis by means of five photosynthesis-light equations* *Limnol. Oceanogr.*, 37(8) , 179-1808

Jassby A.D. and Platt T. 1976. *Mathematical formulation of the relationship between photosynthesis and light for phytoplankton* *Limnol. Oceanogr.*, , 540-547

I.F.F. 2007. *Indice di Funzionalità Fluviale*. Manuale APAT.

Infusino E. 2009. *Apporto e consumo di ossigeno nelle acque correnti da parte degli autotrofi*. Atti del 30° Corso di Aggiornamento in Tecniche per la Difesa dall'Inquinamento. Editoriale Bios, 733-755

- Infusino E. 2010. *Contributo delle alghe alla riossigenazione e deossigenazione dei corpi idrici*. 32° Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche. Palermo
- Marchetti R. e Provini A. 1977. *Ossigeno e carico organico. Indagine sulla qualità del fiume Po*. CNR-IRSA Quaderno n.32, pag 523-550. Roma.
- Marsilli-Libelli . 1989 *Modelli matematici per l'ecologia*, Pitagora Editrice Bologna
- Marsili Libelli S., Giacomelli V., Cavalieri S., Mazzoni M. 2000. *Modellistica Fluviale RTI CTN\_AIM 2/2000*. ANPA, Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente.
- O'Connor D. J., Dobbins. *Mechanism of Reaeration in Natural Streams*. Trans. Am. Soc. of Civil Engineering, 123:614-666, 1958
- O'Connor D. J., Di Toro D. M. *Photosynthesis and oxigen balance in streams*. In Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE Vol. 96, n. SA2:547-571, 1970
- Odum H.T. 1956. *Primary production in flowing waters*. Limnol. Oceanogr., 1:102-117
- Odum E.P. 1973. *Principi di ecologia*. Piccinin editore. Padova
- Odum E.P. 1976. *Ecologia*. Zanichelli editore. Bologna
- Peter M., Taylor A. Steves et ali. 1990 *Botanica* , Zanichelli
- Pignatti S. 2000 *Ecologia Vegetale* UTET,

Pietro Sirini. *Ingegneria sanitaria e ambientale. Principi teorie e metodi di rappresentazione*. Mc Graw-Hill, 2002

Platt, T., Gallegos, C. L., and Harrison, W. G. 1980. *Photoinhibition of photosynthesis in natural assemblages of marine phytoplankton*. Journal of Marine Research. 38:687-701.

Platt T., L. Kenneth, Denman and Alan D. Jassby. 1975. *The Mathematical Representation and Prediction of Phytoplankton Productivity*. Fish. Mar. Servo Res. Dev.Tech. Rep. 523

Platt, T. and Sathyendranath, S. 1988. *Oceanic primary production: Estimation by remote sensing at local and regional scales*. Science.241, 1613–1620.

Smith.E.L. 1936 *Photosynthesis in relation to light and carbon dioxide*. Proc Nail Acad. Sci. USA,22,504-511.

Steele J.H. 1962 *Environmental control of photosynthesis in the sea*. Limnol Oceanogr., 1,137-150.

Streeter H. W., Phelps E. B. *A study for the pollution and natural purification of the Ohio River, III. Factors concening the phenomena of oxidation and reaeration*. US Public Health Service, No 146, Feb. 1925

Susmel L. 2001. *Principi di ecologia*. Cleup Editore Padova.

Talling J.F. 1957 *Photosynthesis characteristics of some freshwater plankton diatoms in relation to underwater radiation*. *New Phytol*, 56, 29-50

Tonolli V. *Introduzione allo studio della limnologia 1964*. Edizioni dell'Istituto Italiano di Idrobiologia. Verbania Pallanza.

Webb W. L., Newton, M., and Starr, D. 1974. *Carbon dioxide exchange of *Alnus rubra*. A mathematical model*. *Oecologia (Berl.)*. 17: 281-291.

## ALLEGATI

### Allegato A

Campagna preliminare di campionamento e di indagine sull'attività fotosintetica della componente autotrofa fiume Busento : 2008

---

Campagna di preliminare campionamento e di indagine  
sull'attività fotosintetica della componente autotrofa del fiume  
Busento

Prova	Data	orario <i>(ora legale)</i>
1	10/06/2008	20:45
2	11/06/2008	06:30
3	21/06/2008	21:00
4	27/06/2008	05:00
5	17/07/2008	14:00
6	25/07/2008	06:00
7	30/07/2008	05:30
8	30/07/2008	14:00
9	08/08/2008	05:45
10	03/09/2008	05:45

---

## Allegato B

Campagna di campionamento e prove : 2008 - fiume Busento (alghe filamentose)

fiume Busento (alghe filamentose)		
Prova	Data Inizio	Data Fine
1 S	23/09/08	23/09/08
2 S	26/09/08	26/09/08
3 S	08/10/08	08/10/08
4 S	10/10/08	10/10/08
5 S	15/10/08	15/10/08
6 S	23/10/08	24/10/08

fiume Busento (alghe filamentose)		
Prova	Data Inizio	Data Fine
1 B	25/09/08	25/09/08
2 B	02/10/08	26/09/08
3 B	08/10/08	08/10/08
4 B	15/10/08	10/10/08

Campagna di campionamento e prove : 2009 - fiume Busento (alghe filamentose)

fiume Busento (alghe filamentose)		
Prova	Data Inizio	Data Fine
1 S	23/08/09	06/08/09
2 S	17/09/09	19/09/09
3 S	28/09/09	30/09/09
4 S	21/10/09	23/10/09

Legenda :

S \_ prova alla luce

B \_ prova al buio

## Allegato C

### Campagna di campionamento e prove : 2009 - fiume Crati - invaso di Tarsia (Fitoplancton)

fiume Crati - invaso di Tarsia (Fitoplancton)		
Prova	Data Inizio	Data Fine
1 S	07/07/09	09/07/09
2 S	13/07/09	17/07/09
3 S	22/07/09	24/07/09
4 S	27/07/09	29/07/09
5 S	29/07/09	31/07/09
6 S	08/09/09	10/09/09
7 S	14/09/09	15/09/09
8 S	14/10/09	16/10/09

### Campagna di campionamento e prove : 2010 - fiume Crati - invaso di Tarsia (Fitoplancton)

fiume Crati - invaso di Tarsia (Fitoplancton)		
Prova	Data Inizio	Data Fine
1 S	01/09/2010	06/09/2010
2 S	06/09/2010	08/09/2010
3 S	15/09/2010	17/09/2010
4 S	17/09/2010	20/09/2010

Legenda :

S \_ prova alla luce

B \_ prova al buio

## Allegato D

### Campagna di campionamento e prove : 2009 - alghe coltivate (Fitoplancton)

---

alghe coltivate (Fitoplancton)		
Prova	Data Inizio	Data Fine
1 B	19/05/09	20/05/09
2 B	29/05/09	03/06/09
3 B	05/06/09	10/06/09
4 B	12/06/09	15/06/09

---

---

alghe coltivate (Fitoplancton)		
Prova	Data Inizio	Data Fine
1 S	20/05/09	22/05/09
2 S	27/05/09	29/05/09
3 S	03/06/09	05/06/09
4 S	10/06/09	12/06/09
5 S	15/06/09	18/06/09
6 S	29/06/09	03/07/09
7 S	10/09/09	14/09/09
8 S	06/10/09	08/10/09
9 S	29/10/09	03/11/09
10 S	16/11/09	18/11/09
11 S	19/11/09	21/11/09

---

Legenda :

S \_ prova alla luce

B \_ prova al buio

Campagna di campionamento e prove : 2010 - alghe coltivate (*Fitoplancton*)

alghe coltivate ( <i>Fitoplancton</i> )		
Prova	Data Inizio	Data Fine
1 S	25/03/10	28/03/10
2 S	29/03/10	31/03/10
3 S	22/04/10	27/04/10
4 S	26/05/10	28/05/10

*Legenda :*

*S \_ prova alla luce*

*B \_ prova al buio*

## Allegato E

### Campagna di campionamento e prove : 2009 - Prove Bianche

Prove Bianche		
Prova	Data Inizio	Data Fine
1	22/07/09	23/07/09
2	08/10/08	10/10/09