

# RICERCHE ED ATTIVITÀ DI MONITORAGGIO AMBIENTALE NELLA GROTTA GRANDE DEL VENTO A FRASASSI (ANCONA)

Mario Cocchioni<sup>1\*</sup>, Sandro Galdenzi<sup>2\*</sup>, Marco Menichetti<sup>3\*</sup>, Federico Montechiaro<sup>4</sup> e Mario Giordano<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Scienze Igienistiche e Sanitarie-Ambientali - Università di Camerino

<sup>2</sup> Istituto Italiano di Speleologia - Sezione di Frasassi

<sup>3</sup> Istituto di Geodinamica e Sedimentologia - Università di Urbino

<sup>4</sup> Lab. di Fisiologia delle Alghe, Dip. di Scienze del Mare, Facoltà di Scienze MM.FF.NN. Università Politecnica delle Marche

\* Comitato Tecnico Scientifico - Grotte di Frasassi

## RIASSUNTO

*Le condizioni ambientali della Grotta Grande del Vento a Frasassi sono costantemente analizzate grazie alle indicazioni di un Comitato Tecnico Scientifico, al fine di salvaguardare una delle grotte turistiche più frequentate in Italia, con oltre 300.000 visitatori annui. Le più recenti attività di studio condotte nella grotta sono brevemente descritte. I dati ambientali acquisiti grazie ad una rete di monitoraggio hanno fornito numerose indicazioni sull'evoluzione stagionale dei flussi d'aria, sulle relazioni esistenti tra zone turistiche e non, sul ruolo degli ingressi naturali ed artificiali. La concentrazione della CO<sub>2</sub> subisce forti riduzioni per l'afflusso di aria esterna dagli ingressi artificiali e più contenuti aumenti causati dalla presenza di visitatori. Le variazioni naturali raggiungono tuttavia entità anche più elevate e la grotta appare capace di assorbire questo tipo di perturbazioni. Il campionamento delle acque sotterranee ad intervalli mensili ha consentito di evidenziare chiari cicli stagionali e di distinguere diversi tipi di acque. Significative differenze sono emerse sia nelle caratteristiche chimiche delle acque percolanti, sia in quelle delle acque freatiche sulfuree.*

*La presenza dei turisti e dell'impianto di illuminazione artificiale comporta inevitabilmente la colonizzazione delle grotte da parte di organismi fotosintetici. La notevole resilienza al buio delle alghe più comunemente rinvenute nella Grotta Grande del Vento (*Phormidium* sp., *Cyanophyceae*) fa ritenere che un oscuramento anche prolungato delle grotte (fino a un mese) non costituisca una strategia efficace per il controllo della crescita algale. Una significativa inibizione della crescita è stata invece ottenuta mediante l'adozione di regimi di illuminazione di appropriate intensità e composizione spettrale.*

## ABSTRACT

*The "Grotta Grande del Vento" at Frasassi, Ancona, is one of the most popular show caves in Italy, with more than 300,000 tourists per year. In order to protect this valuable environment, a Scientific Committee was set up to ensure continuous monitoring of the main chemical, physical and biological parameters. The results of the most recent research activities conducted in the cave are presented here. The analysis of the data collected by the cave monitoring system provided a large amount of information on the seasonal evolution of air fluxes, on the interactions among areas accessible to tourists and restricted areas, and on the role of artificial and natural entrances to the cave. The CO<sub>2</sub> concentration was strongly reduced by the influx of outside air through the artificial entrance, while it was only slightly increased by the presence of tourists. CO<sub>2</sub> levels, however, appeared to be mostly affected by natural phenomena. Whatever the cause of CO<sub>2</sub> perturbations, the cave system appeared to be able to buffer them without major consequences. Sampling of karstic water on a monthly basis allowed to unveil the presence of seasonal cycles and made it possible to characterize several types of water. Water analysis also allowed a thorough description of the differences existing in the chemistry of percolating and sulfuric freatic waters.*

*The colonization and proliferation of photosynthetic organisms in the cave is related to the presence of tourists and artificial light sources. The remarkable resistance to dark incubation shown by the most common algae in the "Grotta Grande del Vento" (*Phormidium* sp., *Cyanophyceae*) indicates that even a prolonged period of obscuration (up to one month) of the cave is not an effective strategy for the control of algal proliferation. A significant inhibition of growth was instead achieved through the adoption of specific light regimes with appropriate photon flux density and spectral quality.*

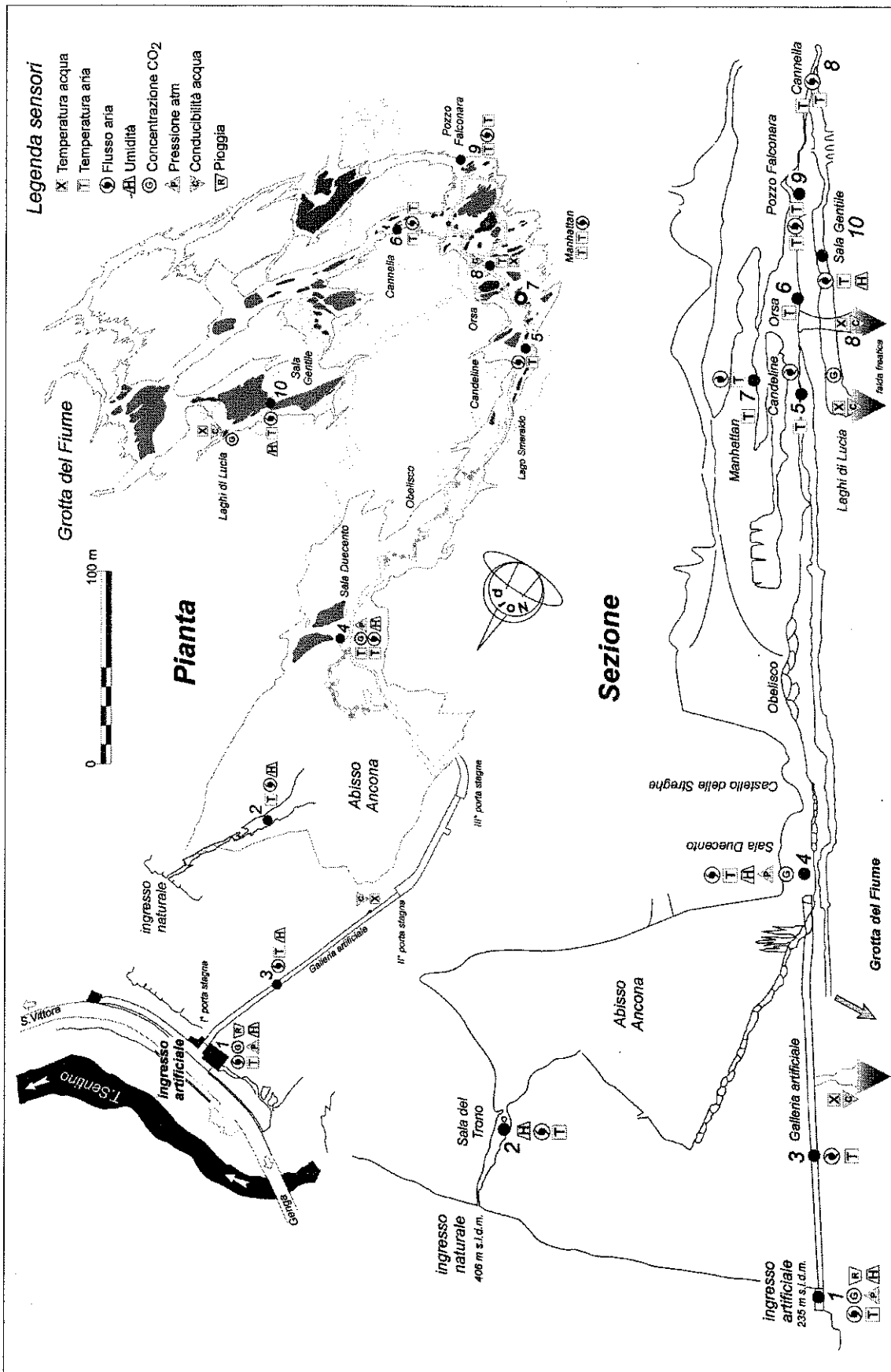


Fig. 1 - Ubicazione delle stazioni di misura e dei diversi tipi di sensori installati nella parte turistica della Grotta Grande del Fiume (Rilievo modificato da Bocchini & Colliotti, 1990).

## INTRODUZIONE

Il complesso della Grotta Grande del Vento si apre nella Gola di Frasassi, in Italia centrale dove si estende per oltre 20 km attraverso una serie di gallerie di andamento sub-orizzontale, poste su piani sovrapposti e collegate da pozzi e grandi sale. La grotta è sviluppata soprattutto nella parte più prossima al versante esterno, ma in alcuni parti si addentra per oltre 1 km all'interno del massiccio calcareo. La parte turistica è stata visitata mediamente ogni anno da circa 300.000 persone dal 1974, quando è stato realizzato il tunnel artificiale che rappresenta l'ingresso turistico.

A partire dal 1975 un comitato di consulenza scientifica ha affiancato, con finalità consultive, l'amministrazione della grotta. Il comitato, nel corso degli anni, ha operato per analizzare gli effetti del flusso turistico e per trovare soluzioni che ne riducessero l'impatto, e contestualmente ha favorito lo sviluppo delle ricerche nella grotta. Ampi resoconti di queste attività sono stati proposti a più riprese, e per una dettagliata descrizione si rimanda a Comitato Tecnico Scientifico (2000), con relativa bibliografia. Nell'ultimo periodo le attività hanno riguardato principalmente l'analisi dei dati di monitoraggio ambientale, lo studio dei caratteri chimici delle acque anche in relazione al loro impiego nella grotta per pulizia ed alimentazione artificiale di laghetti, la mitigazione degli impatti dovuti all'illuminazione, sia come sviluppo di alghe, sia come causa di apporti termici.

## IL SISTEMA DI MONITORAGGIO AMBIENTALE

L'attuale rete di monitoraggio è stata realizzata nel 1997 in sostituzione di un preesistente sistema andato in avaria nel 1993. E' stato recentemente realizzato un approfondito studio (Galdenzi & Menichetti, 2002), comprendente sia la descrizione delle caratteristiche tecniche del sistema e dei criteri seguiti nella progettazione, sia la dettagliata discussione dei dati acquisiti e il loro confronto con le serie storiche di dati. A questo lavoro si rimanda pertanto per una più completa discussione dell'argomento.

Dopo oltre 5 anni di funzionamento continuo è possibile operare alcune considerazioni relative alla funzionalità del sistema di monitoraggio. Il sistema comprende dieci stazioni, alle quali sono collegati 40 sensori per la misura di temperatura di aria ed acqua, umidità relativa, intensità e direzione delle correnti d'aria, pressione atmosferica, conducibilità, concentrazione della CO<sub>2</sub> (Fig. 1). Ogni stazione è dotata di una centralina di comando propria costituita da un modulo di acquisizione e condizionamento dei segnali provenienti dai sensori, da moduli di elaborazione, registrazione e trasmissione dati. Tutte le dieci stazioni sono connesse ad un elaboratore denominato "concentratore" attraverso il quale è possibile gestire ciascuna stazione di misura. A sua volta il "concentratore" è connesso ad un computer che permette di controllare l'intero sistema (Fig. 2).

Larga parte delle stazioni ha operato con sufficiente regolarità e i problemi maggiori sono stati causati da eventi accidentali, in grado talvolta di interrompere la funzionalità stessa dell'intera rete. Alcuni esempi sono stati la mancanza totale di alimentazione elettrica, la rottura accidentale dei cavi di trasmissione dati, manovre errate dell'operatore sulle singole stazioni con perdita dati.

Il funzionamento dei sensori è risultato differenziato. I sensori di temperatura, umidità relativa e flusso dell'aria non hanno creato significativi problemi, garantendo un funzionamento regolare e fornendo dati sostanzialmente affidabili. I sensori per la CO<sub>2</sub> hanno invece evidenziato la necessità di frequenti tarature (almeno ogni tre mesi), mentre i sensori per la conducibilità dell'acqua non hanno fornito dati attendibili per periodi significativi. Le cause di queste anomalie non sono del tutto chiare anche perché insite nelle caratteristiche costruttive delle apparecchiature stesse. Va anche osservato che le stazioni ed i sensori che hanno evidenziato la minore affidabilità (in particolare la conducibilità nelle acque freatiche e la stazione ingresso naturale) sono collocati in zone di difficile accessibilità, dove il solo raggiungimento da parte dei tecnici richiede percorrenze impegnative di tipo strettamente speleologico, ostacolando di fatto la possibilità degli interventi.

Il funzionamento complessivo della rete è soddisfacente per il monitoraggio delle condizioni microclimatiche della grotta al fini della prevenzione di eventuali alterazioni indotte dal flusso turistico.

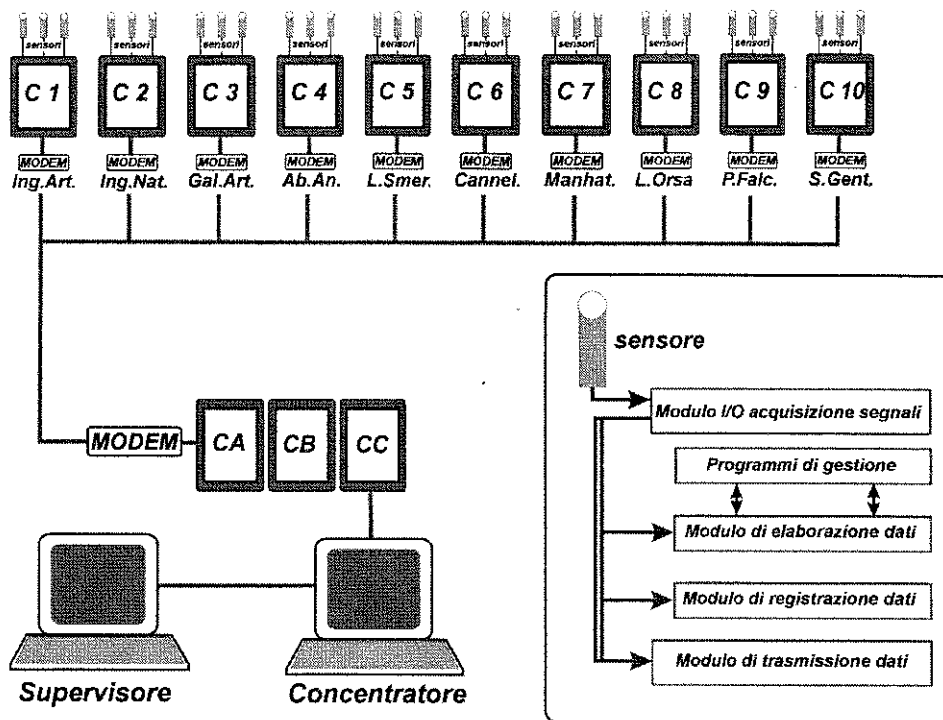


Fig. 2 - Schema generale della rete di monitoraggio in funzione nella parte turistica della Grotta Grande del Vento. Nel riquadro schema a blocchi di una centralina di acquisizione.

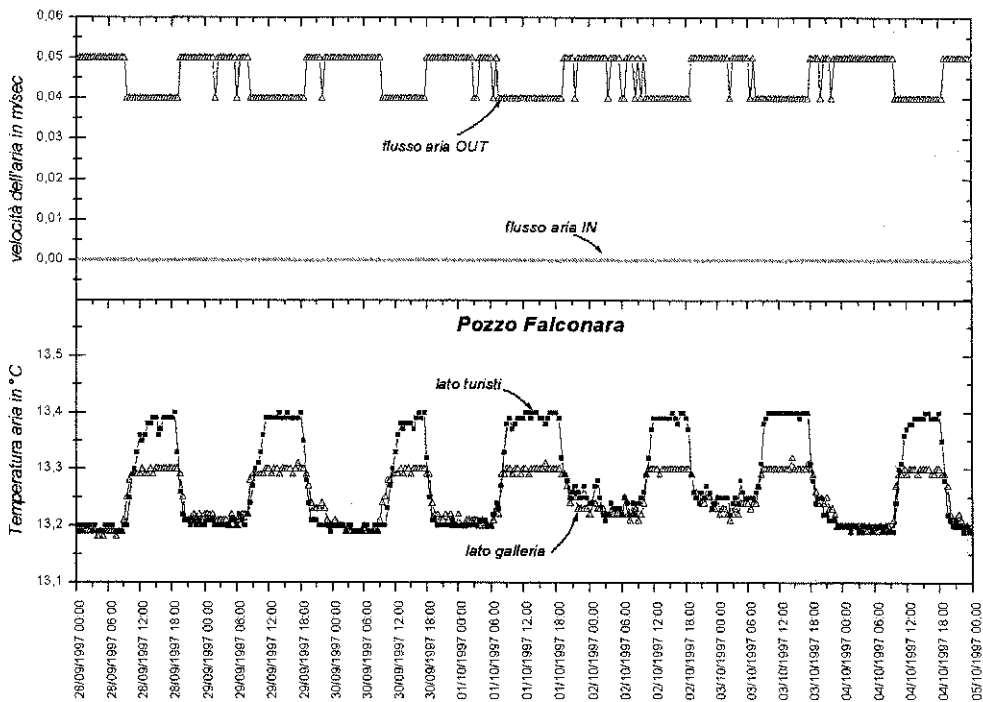


Fig. 3 - Pozzo Falconara - Variazioni della temperatura e del flusso dell'aria tra il 28 settembre e il 5 ottobre 1997. La direzione IN corrisponde a flussi verso l'interno, la direzione OUT a flussi verso l'ingresso artificiale.

Tuttavia, dal punto di vista di una utilizzazione dei dati ai fini più strettamente scientifici, l'attuale sistema di controllo e manutenzione non garantisce una continua supervisione, e pertanto la validazione dei dati acquisiti è risultata possibile solo per brevi intervalli di tempo. I fenomeni di deriva strumentale ed il discontinuo funzionamento di alcuni sensori e stazioni hanno fatto pertanto preferire l'impiego dei dati ambientali come valori relativi, non assoluti.

Tutto questo rende complessa l'utilizzazione completa delle serie temporali attualmente disponibili, mentre più semplice ed affidabile risulta l'analisi delle condizioni del microclima sotterraneo su brevi e selezionati intervalli temporali.

## LE NUOVE INDICAZIONI SULLE CONDIZIONI AMBIENTALI

La collocazione dei sensori della nuova rete di monitoraggio è stata preceduta da campagne preliminari di acquisizione e dall'analisi di una parte significativa dei dati già raccolti per mezzo dei pre-esistenti sistemi di monitoraggio.

Ciò ha reso possibile una migliore collocazione delle stazioni di acquisizione, favorendo la comprensione delle relazioni complesse esistenti tra la parte di grotta accessibile al pubblico, l'ambiente esterno e le altre parti del sistema carsico non interessate dalla frequentazione turistica (Galdenzi & Menichetti, 2002). Vengono di seguito elencate alcune delle conclusioni più significative per la definizione del microclima sotterraneo e delle influenze prodotte dal flusso turistico.

- La variazione della temperatura esterna è il fattore naturale che maggiormente incide sul microclima sotterraneo, con interferenze complesse e diversificate sulla circolazione nelle diverse parti del complesso carsico ipogeo.
- Per quanto gli ingressi naturale ed artificiale dell'Abisso Ancona rappresentino i più diretti collegamenti con l'esterno, la grotta turistica risulta in diretta connessione anche con gli ingressi naturali della Grotta del Fiume attraverso un articolato reticolo carsico.
- Il sistema carsico, nel suo complesso, riesce ad assorbire le perturbazioni termiche indotte dal flusso turistico, anche quando queste raggiungono valori di entità significativa, ma soprattutto è in grado di ripristinare le condizioni originarie, almeno nel breve periodo.
- Gli apporti termici dovuti ai flussi turistici vengono smaltiti, oltre che per mezzo di scambi all'interfaccia aria/roccia, anche grazie alla favorevole circolazione d'aria che dalle zone più interne affluisce verso la parte della grotta turistica (Fig. 3). La costante ricezione di aria attraverso gallerie carsiche collegate con regioni interne del sistema rappresenta così una condizione che consente di mitigare gli impatti sul microclima in ampia parte della zona turistica. E' altresì evidente come l'esistenza di una significativa circolazione d'aria possa trasferire le perturbazioni in altre zone del complesso carsico non aperte al pubblico, non pienamente identificabili sulla base dei dati oggi disponibili.
- Le variazioni rilevate nei contenuti di CO<sub>2</sub> appaiono dipendere da numerose variabili, comprendenti sia probabili apporti di origine interna dalle zone sulfuree, soggetti a rilevanti variazioni stagionali, sia scambi con l'esterno condizionati dall'evoluzione dei flussi d'aria. Le variazioni indotte dall'apertura al pubblico sono di ordine di grandezza inferiore a quelle registrate per cause naturali e sono rapidamente smaltite nelle ore notturne. Possono essere riconosciuti due tipi di interferenze, con effetti opposti: le emissioni dovute alla presenza di visitatori e gli afflussi di aria esterna a minor tenore di CO<sub>2</sub> durante l'apertura delle porte stagne (Fig. 4). L'importanza relativa dei due effetti varia certamente nelle diverse parti della grotta, ed allo stato attuale non è quantificabile.
- E' risultato evidente quanto la collocazione dei sensori possa influenzare il tipo di informazioni ottenute e la stessa interpretazione delle condizioni ambientali. Lo spostamento di poche decine di metri di un sensore per la CO<sub>2</sub> ha infatti rivelato l'esistenza dei consistenti impulsi di aria esterna, a basso tenore di CO<sub>2</sub>, non rilevati in precedenza, responsabili del calo di concentrazione della CO<sub>2</sub> nelle ore diurne nell'Abisso Ancona, in vicinanza dell'ingresso artificiale.

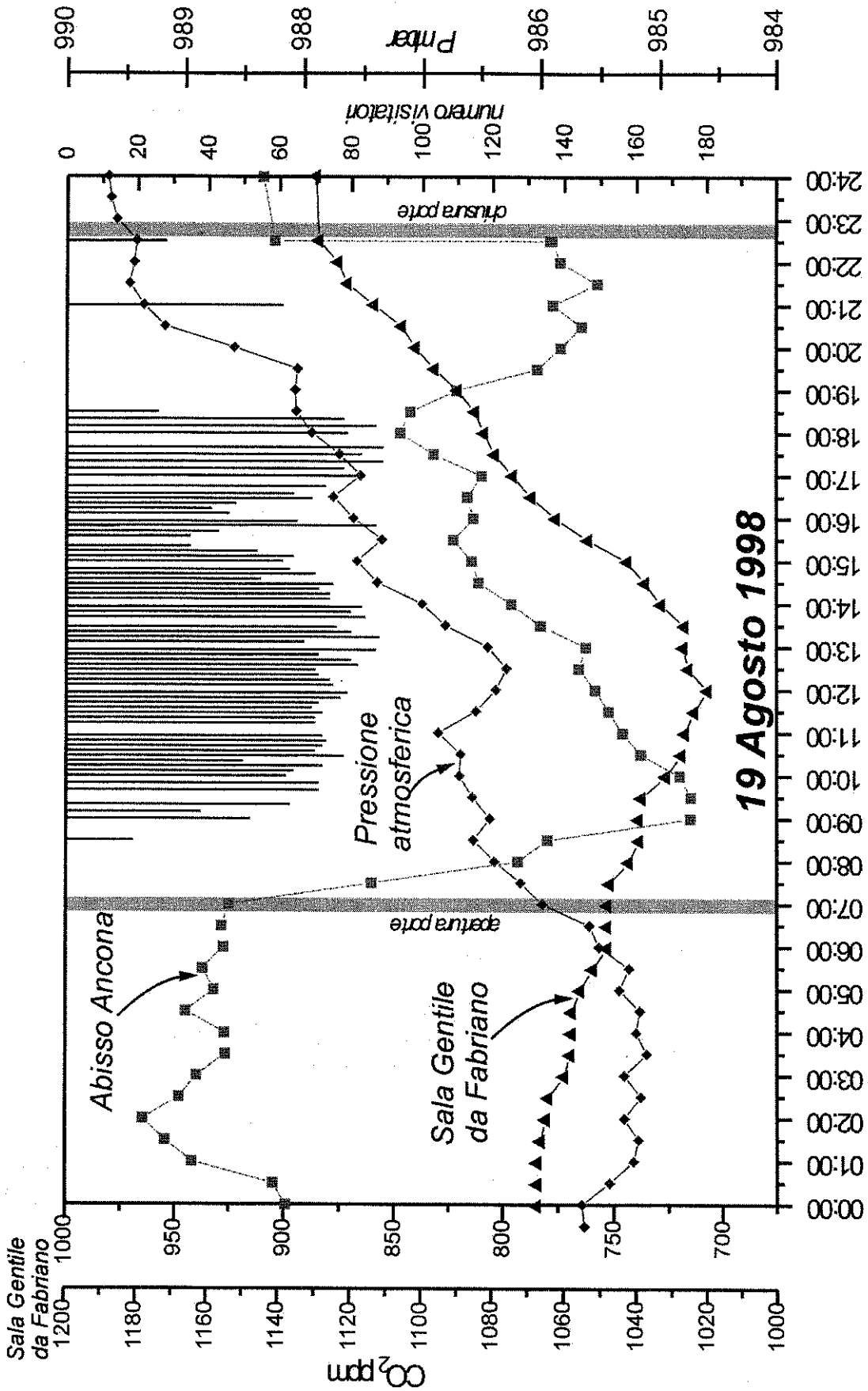


Fig. 4 - Variazione della concentrazione di CO<sub>2</sub> in funzione del flusso turistico, dell'apertura delle porte e della pressione atmosferica nella Gola di Frasassi, alla Sala Gentile da Fabriano e all'Abisso Ancona il 19 Agosto 1998.

## CHIMISMO DELLE ACQUE DEL COMPLESSO IPOGEO DI FRASASSI: ACQUE DI STILLICIDIO ED ACQUE SOLFUREE.

La comprensione della circolazione idrica e del chimismo delle acque all'interno del complesso ipogeo di Frasassi costituiscono acquisizioni fondamentali per una corretta interpretazione della genesi e dell'evoluzione del complesso carsico. Anche una corretta gestione del prezioso patrimonio naturale non può prescindere da tali conoscenze onde prevenire fenomeni di inquinamento che potrebbero irreparabilmente danneggiare il delicato equilibrio dell'ecosistema sotterraneo nonché compromettere l'utilizzo delle acque sulfuree che a valle vengono captate per cure termali.

In questa ottica è stato affrontato dal Dipartimento di Scienze Igienistiche e Sanitarie-Ambientali dell'Università di Camerino uno studio sistematico del chimismo delle acque con particolare riferimento a quelle sulfuree e di stillicidio. I campionamenti, condotti con cadenza mensile, sono stati effettuati nel periodo novembre 2000-dicembre 2001. Contemporaneamente è stato monitorato anche il fiume Sentino che lambisce il complesso ipogeo al fine di evidenziare possibili intrusioni delle sue acque all'interno delle grotte.

Per quanto concerne le *acque di stillicidio* sono stati identificate tre postazioni di campionamento nei seguenti punti: "Sala Abisso Ancona", "Lago Smeraldo", "Sala Pagliai". Per le *acque sulfuree* i campionamenti sono stati effettuati nei punti definiti "Sorgente sulfurea Pozzetto", "Sorgente sulfurea Libera", "Lago Verde Sulfurea", "Ramo sulfureo". Prelievi estemporanei sono stati effettuati anche sul "Lago Lucia" e "Lago dell'Orsa" al fine di una preliminare tipizzazione delle loro acque. Sui campioni prelevati sono stati determinati i seguenti parametri: Temperatura dell'acqua, pH, Conduttività elettrica, Durezza totale, Calcio, Magnesio Ossigeno Disciolto, Percentuale di saturazione, BOD<sub>5</sub>, Cloruri, Solfati, Solfuri, Bicarbonati, CO<sub>2</sub> libera, Sodio e Potassio. Molte ed interessanti le acquisizioni emerse. Si sottolineano in questa sede quelle di maggior rilievo:

- Le acque di stillicidio dell' "Abisso Ancona" e del "Lago Smeraldo" presentano residuo salino (250 mg/L) ed andamento stagionale praticamente sovrapponibili (Fig. 5). Analizzando però l'assetto ionico emerge una differente composizione: lo stillicidio dell' "Abisso Ancona" risulta significativamente più ricco in sodio, potassio, cloruri, solfati mentre quelle del "Lago Smeraldo" in calcio e bicarbonati. Tali variazioni si compensano e fanno sì che i due campioni alla fine presentino valori di conduttività elettrica pressoché equivalenti.
- Le acque di stillicidio della "Sala Pagliai" mostra una conduttività ed una composizione ionica più modesta per tutti gli elementi. L'andamento temporale della salinità ricalca quello evidenziato nei due stillicidi precedenti, ma limitatamente al periodo novembre 2000-luglio 2001. Nel mese di agosto si assiste infatti ad una evidente flessione per poi risalire e riallinearsi nei successivi mesi di ottobre e novembre.
- L'anidride carbonica libera presenta, in tutte le acque di stillicidio, due picchi rispettivamente nei mesi di aprile e di agosto. (Da ricondurre forse al maggior afflusso turistico del periodo pasquale e del periodo feriale). I valori più elevati si registrano negli stillicidi di "Lago Smeraldo" e "Sala Pagliai".
- Per quanto concerne le acque sulfuree è emersa una sostanziale similitudine, come residuo salino, come composizione ionica e come andamento temporale dei vari parametri, tra "Sulfurea Pozzetto" e "Sulfurea Lago Verde" (Fig. 6). I valori medi di conduttività coincidono (2360  $\mu$ S/cm) e l'assetto ionico nel corso dell'anno è praticamente sovrapponibile.
- Anche le altre due acque "Sorgente sulfurea Libera" "Ramo sulfureo", pur presentando una salinità alquanto inferiore rispetto alle precedenti, mostrano evidenti analogie sia in composizione che come andamento dei vari parametri nell'arco dell'anno.
- I prelievi estemporanei effettuati sul "Lago Lucia" e sul "Lago dell'Orsa" non permettono una analisi critica temporale. Sono evidenti tuttavia la minore mineralizzazione delle acque del "Lago Lucia" rispetto a tutte le altre e la presenza di stratificazione nel "Lago dell'Orsa" dove si rilevano in profondità acque con valori di salinità e composizione ionica ricollegabili a quelle del "Ramo sulfureo" ed in superficie acque simili a quelle dello stillicidio.

I risultati emersi dal presente studio, integrati ed interfacciati con quelli relativi ai livelli idrici, potranno fornire ulteriori interessanti acquisizioni anche sulla possibile influenza del Fiume Sentino nel chimismo delle acque all'interno del complesso ipogeo.

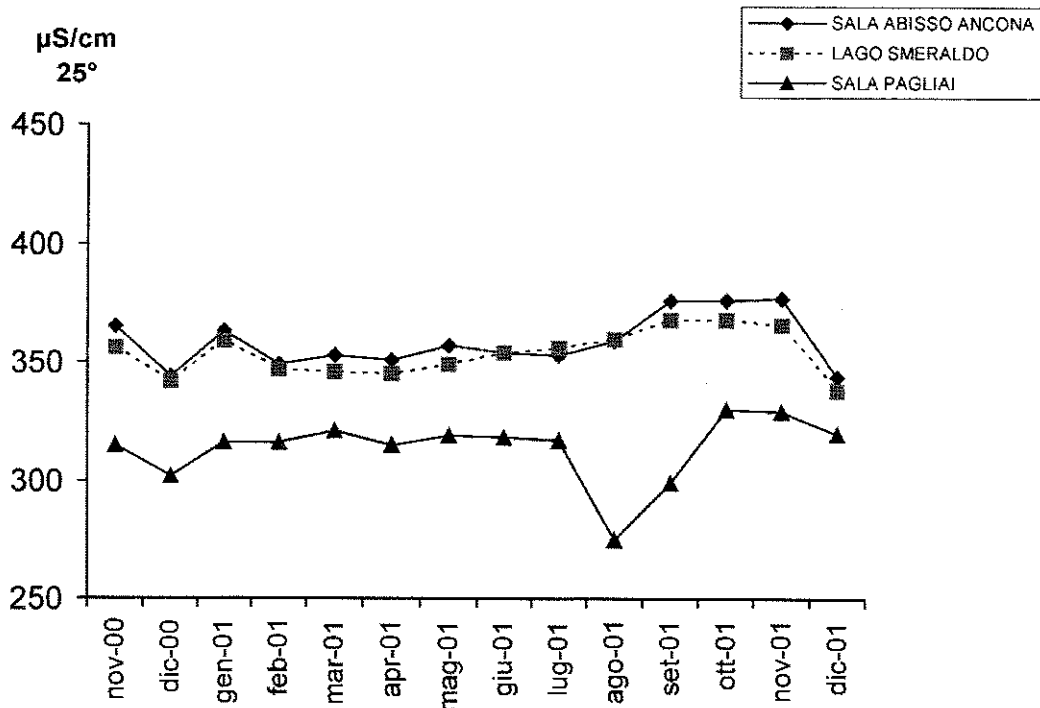


Fig. 5 - Andamento temporale della conducibilità elettrica nelle acque di stillicidio.

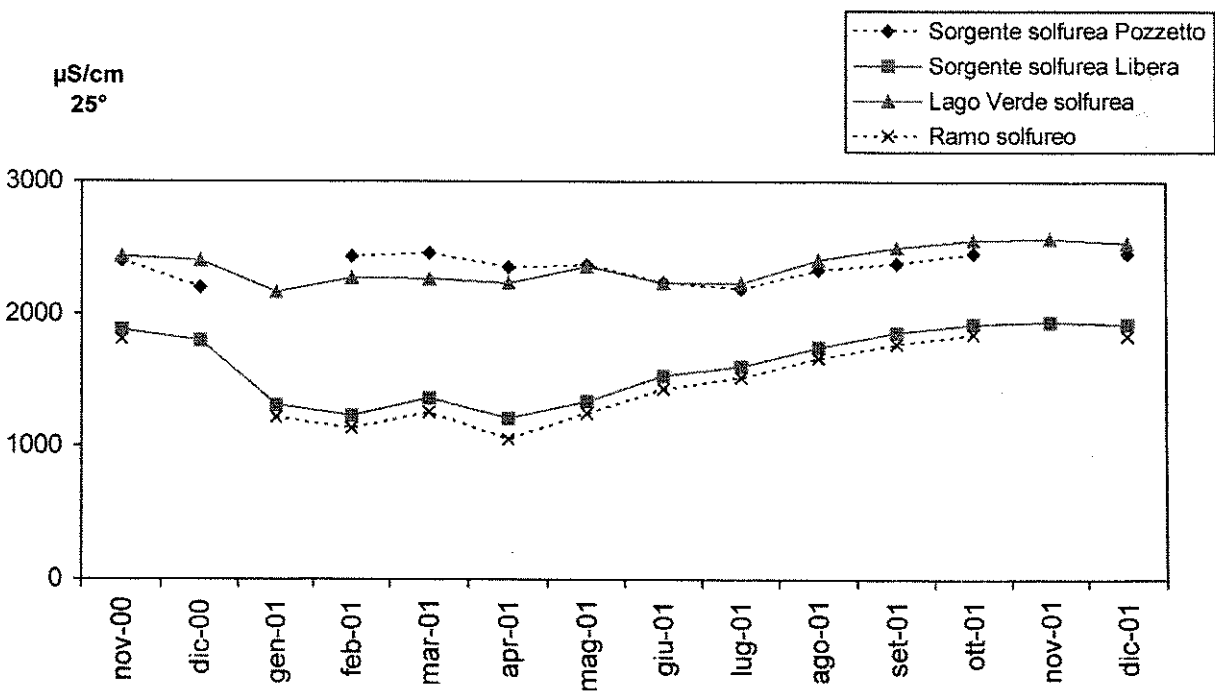


Fig. 6 - Andamento temporale della conducibilità elettrica nelle acque solfuree.



## NUOVO APPROCCIO PER IL CONTROLLO DELLA CRESCITA ALGALE

I progetti di ricerca che negli ultimi anni sono stati compiuti sulle alghe delle Grotte di Frasassi hanno permesso di accumulare una massa critica di informazioni che consente lo sviluppo di una strategia innovativa per il controllo della flora algale nelle grotte turistiche (Giordano et al., 2000; Montechiaro, 2003). La novità dell'approccio adottato risiede nell'utilizzo delle cognizioni acquisite mediante studi fisiologici per lo sviluppo di un ciclo virtuoso che culmini nel controllo della proliferazione algale con un minimo impiego di risorse umane, un ridotto o nullo impatto sulle formazioni calcaree e un moderato investimento iniziale. I dati fisiologici ottenuti, infatti, mostrano come la scelta dei corpi illuminanti e del regime di illuminazione sia fondamentale per la riduzione della crescita algale (vedi tabella)

Regime di illuminazione	Tasso di crescita specifico (giorni <sup>-1</sup> )		Tempo di duplicazione (giorni)	
	Proteine	Clorofilla <i>a</i>	Proteine	Clorofilla <i>a</i>
A	0.445 (0.043)	0.220 (0.020)	1.56 (0.156)	3.15 (0.315)
B	0.387 (0.041)	0.164 (0.072)	1.80 (0.130)	3.57 (1.320)
C	0.237 (0.046)	0.178 (0.040)	2.92 (0.556)	3.89 (0.857)

Legenda - Tassi di crescita specifici espressi in termini di variazione del contenuto di proteine e di clorofilla *a*, in colture esposte a tre regimi di illuminazione. A: lampade di attualmente in uso nelle Grotte di Frasassi (Philips PAR 38 EC Flood, 120W); B: lampade di nuova concezione (Philips Capsuleline Pro, 50W); C lampade di nuova concezione con filtro dicroico (vedi figura 1 per lo spettro di trasmittanza). In parentesi sono riportati gli errori standard (n = 4).

La sottrazione di radiazioni di lunghezze d'onda raccolte dall'antenna del fotosistema 2 si è dimostrata particolarmente utile per limitare la capacità fotosintetica delle alghe azzurre, che sono spesso la principale componente autotrofa degli ecosistemi di grotta.

L'attenuazione di componenti specifiche dello spettro elettromagnetico è realizzabile mediante l'uso di filtri cromatici che consentano di intercettare le lunghezze d'onda che più stimolano l'attività fotosintetica degli organismi di cui si intenda inibire la crescita (Fig. 7). E' infatti la fotosintesi a fornire le materie prime per la riproduzione e l'incremento di biomassa (es.: Lawlor, 2001).

Limitando quindi l'attività fotosintetica e conseguentemente il potenziale riproduttivo delle alghe è possibile esercitare un controllo a priori sulla loro proliferazione, risparmiando così alle formazioni calcaree e all'ecosistema gli aggressivi trattamenti chimici solitamente utilizzati (Grobbelaar, 2000). Peraltro, la eliminazione a posteriori della alghe in grotta di solito produce effetti esteticamente non ottimali, in quanto la degradazione per ossidazione della sostanza organica lascia inevitabilmente sul substrato calcareo residui visibili ad occhio nudo.

Gli esperimenti condotti hanno inoltre evidenziato il fatto che i periodi di buio normalmente imposti alle grotte (un mese circa) non sono sufficienti a determinare la perdita di vitalità nelle alghe. Ciò è dovuto alla capacità di tali organismi di mantenere livelli metabolici sufficienti alla sopravvivenza (Figg. 8 e 9) anche in condizioni prolungate di assenza di luce.

Il controllo della proliferazione algale potrebbe essere effettuato mediante periodi di oscuramento delle grotte estremamente prolungati (oltre i due mesi). Tuttavia, ragioni economiche rendono questa opzione poco praticabile.

**BIBLIOGRAFIA**

- Comitato Tecnico Scientifico (2000) - Researches and monitoring activities in the Grotta Grande del Vento, show cave at Frasassi (Ancona , Italy).Proc. III Congr. ISCA "Where, How Why", santadi, 19-25 oct. 1998, 159-163.
- Galdenzi S. & Menichetti M. (2002) - Il monitoraggio ambientale nelle Grotte di Frasassi: struttura della rete di acquisizione e nuove indicazioni sul microclima. Le Grotte d'Italia, s. V, 3, 75-86.
- Giordano M., Mobili F., Pezzoni V., Hein MK., Davis JS. (2000). Photosynthesis in the caves of Frasassi (Italy). Phycologia 39 (5): 384-389.
- Grobbelaar JU (2000). Lithophytic algae: major threat to the karst formation of show caves. Journal of Applied Phycology 12, 309-315.
- Lawlor DW (2001). Photosynthesis. Springer Verlag; 3a ed., 386 pp.
- Montechiaro F (2003). Nuova strategia per il controllo della crescita algale nelle grotte turistiche: risposte fisiologiche di *Phormidium autumnale* a condizioni ipofotiche e afotiche. Tesi di Laurea, Università Politecnica delle Marche, Ancona, pp. 150.

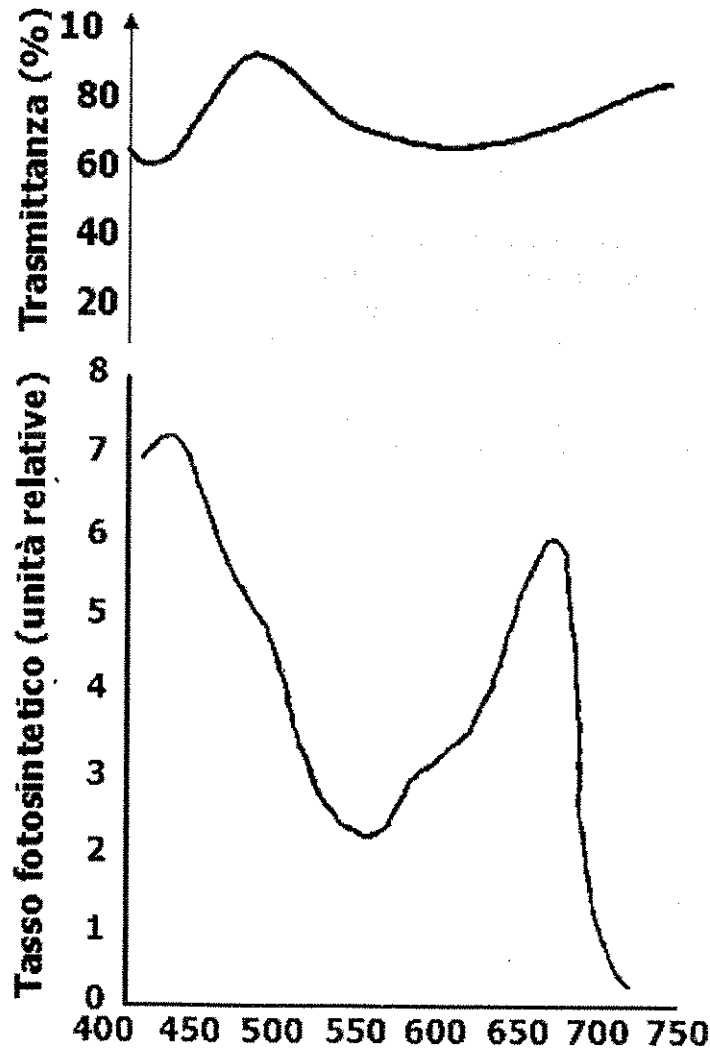


Fig. 7 - Effetto di attenuazione dei filtri cromatici sullo spettro di emissione delle lampade di nuova concezione (in alto) e spettro di azione di cianobatteri (in basso).

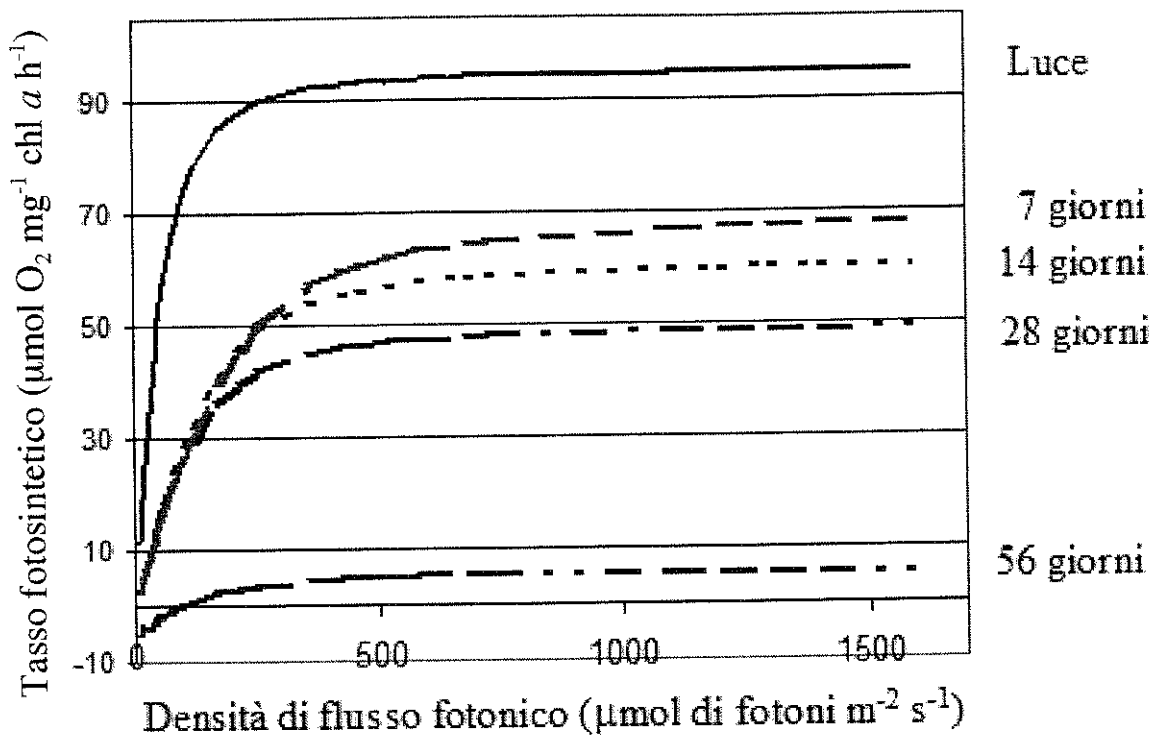


Fig. 8 - Risposta fotosintetica alla densità di flusso fotonico di cellule incubate al buio, in grotta, per periodi diversi ( $n = 4$ ;  $r_2 > 0.95$ ).

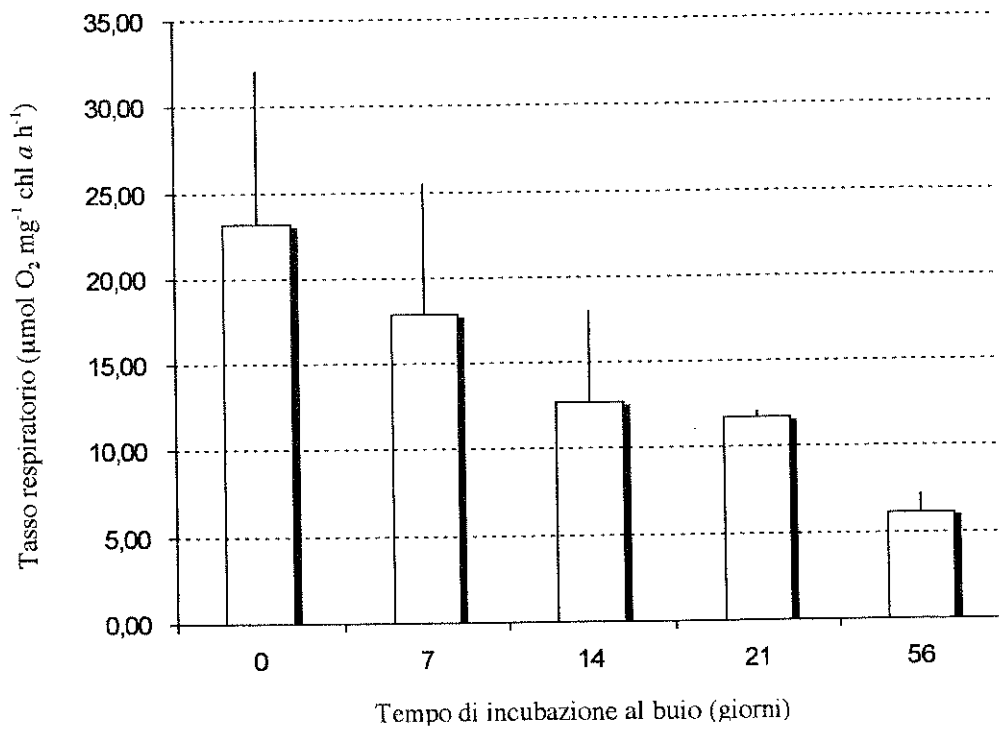


Fig. 9 - Tassi respiratori in funzione del tempo di incubazione al buio ( $n = 4$ ).