



associazione Alessandro Bartola
Studi e ricerche di economia e di politica agraria

Collana Tesi on-line

Barbara Torres

**SVILUPPO DI PRATICHE
SPERIMENTALI ECO-TECNOLOGICHE
PER LA MANUTENZIONE E GESTIONE DI
UN SOLAR POND DESTINATO A
GARANTIRE L'AUTONOMIA
ENERGETICA DI UNA COMUNITÀ
RURALE**

INTRODUZIONE

CAPITOLO I - Il sistema solar pond

CAPITOLO II - Calcolo dell'efficienza termica

CAPITOLO III - Mantenimento della trasparenza

CAPITOLO IV - Mantenimento del gradiente salino

CAPITOLO V - Applicazioni pratiche

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Numero 25 – Ottobre 2009



associazione Alessandro Bartola
Studi e ricerche di economia e di politica agraria

Collana Tesi on-line

Barbara Torres

**SVILUPPO DI PRATICHE
SPERIMENTALI ECO-TECNOLOGICHE
PER LA MANUTENZIONE E GESTIONE DI
UN SOLAR POND DESTINATO A
GARANTIRE L'AUTONOMIA
ENERGETICA DI UNA COMUNITÀ
RURALE**

INTRODUZIONE

CAPITOLO I - Il sistema solar pond

CAPITOLO II - Calcolo dell'efficienza termica

CAPITOLO III - Mantenimento della trasparenza

CAPITOLO IV - Mantenimento del gradiente salino

CAPITOLO V - Applicazioni pratiche

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Numero 25 – Ottobre 2009

Ringraziamenti

Grazie a tutti quelli che loro malgrado sono stati coinvolti in questo lavoro. A chi lo ha apprezzato e a chi con pazienza ha sopportato la mia ansia e compreso la mia emozione.

Grazie ai professori Principi e Danovaro che mi hanno seguito, ma soprattutto grazie a Gian Marco Luna che mi ha aiutato in tutte le fasi critiche e non del lavoro e senza il quale la mia tesi non avrebbe forma né consistenza.

INDICE

PREFAZIONE.....	7
1 IL SISTEMA SOLAR POND	9
1.1. Introduzione alla tecnologia.....	9
1.2. Costruzione	10
1.3. Operazioni di gestione.....	11
1.3.1. Controllo degli effetti del vento.....	11
1.3.2. Estrazione del calore	12
2 CALCOLO DELL'EFFICIENZA TERMICA	15
2.1. Input di radiazione solare	15
2.1.1. Trasmissione della luce solare in acqua	15
2.1.2. Radiazione diffusa e scattering.....	16
2.2. Modello a stato stazionario.....	17
2.2.1. Analisi termica della zona gradiente.....	18
2.2.2. Perdita di calore dal terreno ed efficienza.....	22
2.2.3. Temperatura della zona superficiale.....	23
2.2.4. Riflessività del fondo	25
3 MANTENIMENTO DELLA TRASPARENZA.....	27
3.1. Il problema della trasparenza: stato dell'arte	27
3.2. Materiali e Metodi	29
3.2.1. Sito di studio ed attività di campionamento.....	29
3.2.2. Fase sperimentale: instaurazione del gradiente.....	32
3.2.3. Sperimentazione dei trattamenti in microcosmo	36
3.2.4. Analisi della torbidità.....	37
3.2.5. Analisi della materia particellata sospesa (TSM).....	38
3.2.6. Analisi dei pigmenti fotosintetici particellati.....	39
3.2.7. Analisi statistiche.....	41
3.2.8. Analisi microbiologiche.....	41
3.3. Risultati.....	42
3.3.1. Caratterizzazione del solar pond.....	42
3.3.2. Trattamenti.....	47
3.4. Discussione	56
4 MANTENIMENTO DEL GRADIENTE SALINO	61
4.1. Il problema del gradiente salino.....	61
4.2. Metodi di misura della salinità.....	62
4.2.1. Primo metodo.....	62
4.2.2. Secondo metodo.....	64
4.3. Correzione del gradiente.....	65

4.4. Sperimentazione sulla tecnica di ripristino.....	66
4.4.1. Materiali e metodi.....	66
4.4.2. Risultati.....	68
5 APPLICAZIONI PRATICHE	73
5.1. Interventi di politica energetica internazionale.....	73
5.1.1. International emission trading.....	73
5.1.2. Joint implementation.....	74
5.1.3. Clean development mechanism.....	75
5.2. La situazione nazionale	75
5.2.1. Quote di riduzione della CO ₂	76
5.2.2. Radiazione solare disponibile	76
5.3. Applicazioni possibili.....	78
5.3.1. Desalinizzazione.....	79
5.3.2. Produzione di energia, sale e acqua potabile.....	81
5.3.3. Maricoltura.....	81
5.4. Progetto di una unità produttiva per comunità rurale.....	82
5.4.1. Sito in esame.....	83
5.4.2. Ipotesi di progetto.....	84
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	91

PREFAZIONE

Il fabbisogno di energia, nei Paesi industrializzati, è in continuo aumento. Se poi a questo si aggiunge la richiesta, sempre maggiore, dei Paesi in via di sviluppo che ospitano la gran parte della popolazione mondiale, si può prevedere che in un prossimo futuro la richiesta di energia sarà incontenibile. Per i Paesi in via di sviluppo esistono, però, ulteriori problematiche legate alla produzione locale di cibo. Nuclei produttivi localizzati in zone strategiche porterebbero ad aumentare la disponibilità di derrate alimentari per il fabbisogno interno, ma non solo. Si creerebbero infatti occasioni di reddito anche per quelle popolazioni che a causa delle difficili situazioni ambientali non ne avrebbero disponibilità. Le particolari condizioni di irraggiamento solare, ma le forti escursioni termiche di zone desertiche, potrebbero essere un valido motivo per pensare a installazioni di sistemi adatti ad incrementare la produzione agricola.

È ormai palese che non si può vivere di solo petrolio e gas, ma si rende necessaria una strategia comune basata sulla ricerca e realizzazione di fonti alternative di energia e sulla tutela dell'ambiente. Sull'energia si gioca quindi la partita più difficile. La transizione energetica verso il rinnovabile è diventata una scelta obbligata soprattutto in luce dell'attuazione del protocollo di Kyoto e della lotta al riscaldamento globale. Questo processo di transizione può richiedere anche alcuni decenni, ma ha bisogno da subito dell'attuazione di strategie condivise a livello internazionale, nazionale e locale.

L'utilizzo dell'energia "pulita", rispetto a quelle basate sui combustibili fossili, presenta l'ulteriore vantaggio di essere presente ovunque nel mondo e quindi di interessare ogni Paese, indipendentemente dalla sua condizione economica. L'Italia, poi, ed in particolare la Sicilia, si trova nelle condizioni ideali per impostare un serio programma di sfruttamento dell'energia eolica e solare.

L'idea di utilizzare il sole ai fini industriali su grande scala per la produzione d'energia elettrica non è più così lontana.

*Lo sfruttamento dell'**energia solare** può avvenire in diversi modi e per diversi scopi. La trasformazione diretta in energia elettrica si ha mediante celle fotovoltaiche, che però a causa degli alti costi di produzione, non potranno avere un ulteriore sviluppo rispetto alla situazione attuale.*

Un secondo metodo prevede la produzione di calore ad alta temperatura grazie a collettori a concentrazione. Questi collettori sono dei pannelli solari termici in

cui si utilizza un sistema di specchi per concentrare i raggi solari a partire da un'area più ampia su di una superficie più ristretta. Essi hanno in genere maggiori rendimenti e maggiori costi dei pannelli piani a parità di superficie, ma consentono di ottenere un'energia termica di maggior qualità, grazie alla superiore temperatura del fluido riscaldato. Vi sono diversi tipi di collettori a concentrazione: sulla base della loro geometria si possono suddividere in due principali categorie, a seconda che il fuoco sul quale concentrano i loro raggi sia un segmento di retta oppure un punto. Questa tipologia di collettori è utilizzata per temperature maggiori di 100 °C. Tutti i collettori a concentrazione richiedono un sistema meccanico di orientazione in funzione dei movimenti del Sole.

Un terzo metodo si basa sulla produzione di calore a bassa temperatura. Questo processo si riferisce agli stagni solari o "solar ponds" ed è opportuno considerare con la dovuta attenzione questo sistema che utilizza l'energia solare in modo alternativo a quella tradizionale e con costi accettabili.

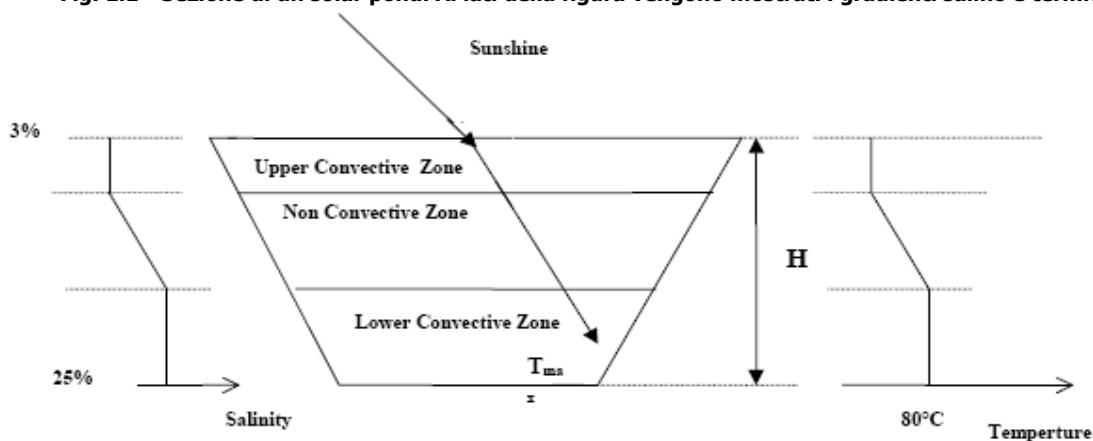
1 IL SISTEMA SOLAR POND

1.1. Introduzione alla tecnologia

Il solar pond è un particolare tipo di lago solare a soluzione salina. La sua concentrazione è crescente con la profondità, e la salinità varia da valori molto bassi vicino alla superficie a valori di saturazione sul fondo. La forte differenza di densità, dovuta al gradiente di salinità e di temperatura che si instaura, permette di avere una stratificazione tale da formare tre zone separate.

La prima zona superficiale è detta UCZ (upper convective zone), è la più sottile, ha una concentrazione salina prossima allo zero e caratteristiche convettive. La zona intermedia, detta NCZ (non convective zone), è caratterizzata da un gradiente termico e salino, a concentrazione crescente con la profondità, e non è a carattere convettivo. La zona di fondo LCZ (lower convective zone) ha l'importante funzione di immagazzinare il calore e, come la prima zona, è convettiva e ha un andamento salino e termico costante (Fig. 1.1). In un lago normale, quando i raggi solari riscaldano l'acqua questa, essendo più leggera, sale in superficie e perde il suo calore in atmosfera, con il risultato che il lago rimane quasi a temperatura atmosferica. La tecnologia solar pond inibisce questo fenomeno grazie alla presenza del gradiente salino che intrappola il calore nello strato inferiore evitandone la dispersione e favorendone l'accumulo.

Fig. 1.1 - Sezione di un solar pond. Ai lati della figura vengono mostrati i gradienti salino e termico



Fonte: Hull, Nielsen, Golding, (1989)

L'idea da cui si è sviluppata questa tecnologia deriva dall'osservazione nei primi anni del 1900 di fenomeni naturali verificatesi in alcuni laghi salati della Transilvania.

L'applicazione energetica del solar pond risiede nello sfruttamento del calore immagazzinato tal quale come energia termica o può essere trasformato in energia elettrica. I vantaggi di usare questa tecnologia riguardano i bassi costi di installazione e manutenzione, lo stoccaggio incorporato nel sistema e la possibile costruzione di laghi solari su grande scala.

1.2. Costruzione

La costruzione del sistema è fondamentale per il corretto funzionamento del solar pond e devono essere considerati diversi aspetti, fra cui permeabilità naturale del terreno, radiazione solare incidente, disponibilità di acqua e sale, geologia del sito e servizi di base come strade, elettricità e sistemi di comunicazione.

Per i lavori di scavo si seguono le direttive ingegneristiche relative alla costruzione di laghi o di riserve di acqua dolce con particolare attenzione nella progettazione allo spazio di pompe per l'estrazione, apparecchiature per il sistema di controllo e strumenti per il monitoraggio e la registrazione dei dati. La tecnica più conveniente è scavare un volume di terra sufficiente per la costruzione dei bordi del pond e non pari al volume del lago, in questo modo infatti si risparmia sullo smaltimento della terra in eccesso e sui lavori di scavo. Per i bordi si deve adottare una pendenza non superiore al rapporto verticale:orizzontale di 1:3, e ci si deve assicurare della loro stabilità e scarsa franabilità.

Se il terreno non presenta delle condizioni naturali soddisfacenti di impermeabilità si deve applicare sul fondo del lago una membrana di contenimento detta liner, che eviti perdite in termini di acqua, sale e calore. Per la sua installazione, le operazioni preliminari riguardano la liberazione del suolo da radici e pietre e il trattamento con erbicidi e insetticidi così da impedire la crescita di piante o animali infestanti. L'utilizzo di sabbia, invece, facilita il rilascio di gas che possono danneggiare o distruggere il liner per le deformazioni causate dalla loro risalita.

Un problema importante al fine dell'efficienza del sistema è la perdita di energia termica e soluzione salina. Questa va infatti calcolata senza errori, in modo da poter stimare gli effettivi tassi di perdita e apportare eventuali modifiche al sistema per abbassarli qualora fossero troppo alti. La perdita di

soluzione salina e calore non è un problema soltanto per l'efficienza, ma costituisce anche un rilevante rischio di contaminazione ambientale. La percolazione di acqua satura di sale nel sottosuolo può, infatti, mettere a rischio falde freatiche o riserve di acqua dolce presenti nelle vicinanze del solar pond. Per questo motivo una delle regole principali nella scelta del sito per la costruzione è l'assenza di corsi d'acqua dolce sia superficiali che sotterranei.

In quest'ottica è chiaro che il liner riveste una funzione fondamentale, e che la sua installazione può essere evitata soltanto in seguito ad un'analisi geologica accurata e precisa, che ne indichi l'irrilevanza.

Nel corso degli anni sono state sperimentate le prestazioni di diversi materiali per il liner fra cui:

1. **EPDM**, viene usato anche per la costruzione dei collettori solari nelle piscine e non ha mai dato perdite;
2. **Butynolo**, può essere installato con diversi spessori; quello da 1mm ha provocato gravi problemi per il distacco di lastre dal fondo, mentre quello da 3 mm funziona bene ma necessita di lunghi tempi di montaggio (1 settimana);
3. **XR-5**, ha funzionato bene per 4 laghi su 6 in cui è stato sperimentato e, nei casi in cui ha fallito è stato per cause non legate alla resistenza della membrana, ma alle errate operazioni di montaggio;
4. **Polipropilene**, funziona bene, ma essendo costituito da lastre pesanti che vanno installate tramite gru, ha alti costi di installazione.

1.3. Operazioni di gestione

1.3.1. Controllo degli effetti del vento

Il vento può causare un rapida crescita della zona di superficie e, a causa della formazione di onde, dispersione del calore. Per evitare questi effetti si possono usare barriere poste sopra o di lato al pond che limitino la velocità del vento o strutture poste sulla superficie che limitino la formazione di onde o la circolazione di acqua.

Al primo caso appartengono tutti gli interventi esterni al lago, come barriere arboree o artificiali. Al secondo caso fanno, invece, riferimento barriere galleggianti di plastica trasparente e di diversa configurazione (tipicamente a rete intrecciata con spaziatura di 6m), che rappresentano il minimo ostacolo alla radiazione solare, ma che danno un'efficace protezione (Fig. 1.2). Per aumentare l'efficienza di queste strutture e minimizzare i costi, si può procedere

unendo insieme più metodi, combinando cioè topografia, barriere arboree e strutture galleggianti.

Fig. 1.2 - Barriere galleggianti applicate per ridurre gli effetti del vento sul solar pond di Pyramid Hill, Victoria, Australia



Fonte: <http://www.geocities.com/daveclarkecb/Environment.html>

1.3.2. Estrazione del calore

Per estrarre l'energia termica dal solar pond ci sono due metodi: scambiatore interno con circolazione di acqua dolce o scambiatore esterno al pond con circolazione della soluzione salina prelevata direttamente dal pond.

Scambiatore interno: in questo caso lo scambiatore viene inserito direttamente all'interno dello strato convettivo inferiore (LCZ) e viene fatta circolare acqua dolce o un altro fluido attraverso di esso. Può essere di materiale metallico o plastico. Quello di metallo è limitato nel trasferimento di calore a causa della naturale convezione della zona, mentre quello in plastica è limitato dalla caratteristica conduttività termica ed ha bisogno di una superficie maggiore rispetto al primo. La localizzazione deve essere vicino al limite superiore della zona di stoccaggio (LCZ), perché se posizionata sul fondo può creare una stratificazione termica che limiterebbe il tasso di estrazione del calore a causa della conduttività termica della zona stessa. Lo scambiatore interno può anche essere supportato da piattaforme galleggianti sulla superficie del pond, fatte di legno o materiale plastico resistente ad alte temperature.

La piattaforma, però, presenta delle limitazioni legate al fatto che, una volta posizionata, difficilmente può essere spostata e inoltre costituisce un ostacolo alla radiazione solare. I principali svantaggi dello scambiatore interno sono che si possono verificare processi di corrosione dovuti alla formazione di celle elettrochimiche tra le parti dei materiali metallici e che è difficile localizzare eventuali guasti e ripararli, se non con la sospensione dell'attività del pond. Inoltre per laghi di grandi dimensioni lo scambiatore viene posizionato vicino ad un lato e non al centro, causando in questo modo una distribuzione di temperatura non omogenea e riducendo la performance del pond.

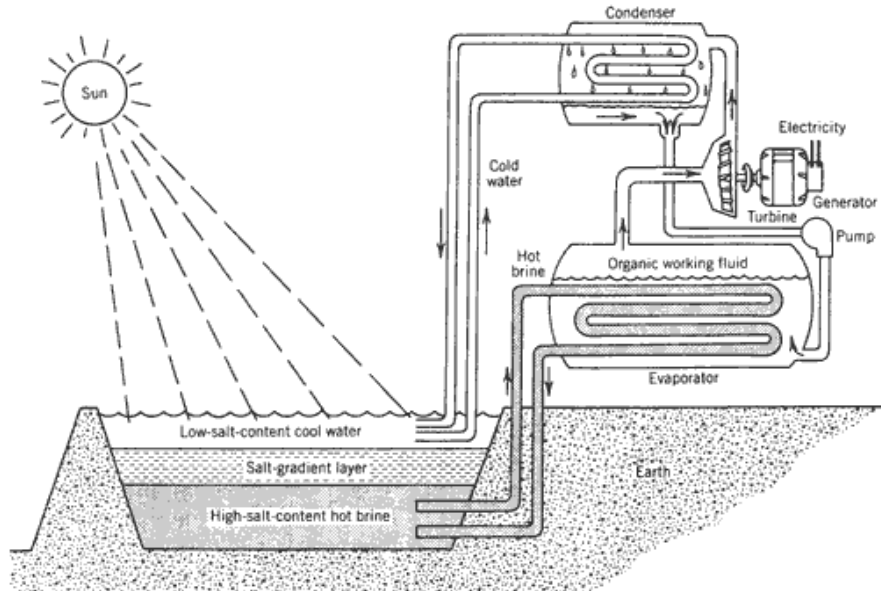
Scambiatore esterno: in questo caso il fluido caldo viene prelevato all'apice della zona di stoccaggio (LCZ) e, dopo essere passato per lo scambiatore, viene reinserito freddo sul fondo. I vantaggi che presenta questo metodo risiedono nel fatto che la superficie richiesta per lo scambio del calore è minore rispetto al primo metodo ed è più facile riparare eventuali danni o anomalie della strumentazione (Fig. 1.3). Il sistema di estrazione ed immissione, però, deve essere ben progettato perché il movimento del fluido può creare turbolenza e conseguente perdita di calore e stabilità. I problemi riscontrati con questa configurazione non solo sono legati all'erosione del gradiente, ma anche al sistema di pompaggio che deve essere resistente alla corrosione causata dalla salamoia calda che vi circola. Inoltre, se il sistema rilascia aria, le bolle che si formano possono cambiare il potenziale corrosivo e danneggiare così la zona gradiente a causa dell'azione di risalita delle bolle.

Un esempio è il pond di Bet Ha Arava, in Israele, dove hanno usato scambiatori esterni su larga scala che non hanno dato problemi di erosione della zona gradiente grazie all'adeguata progettazione e alla velocità dei flussi scelta in modo opportuno.

Da studi condotti in India lo scambiatore esterno è risultato essere intrinseco alla natura idrodinamica del flusso del pond e che l'estrazione del fluido salino non comporta un elemento di disturbo se il sistema liquido ha un gradiente di densità stabile. Anche nel caso indiano si è preferito adottare lo scambiatore esterno.

Va considerato però, che lo scambiatore esterno necessita di una quantità di tubazioni e pompe maggiore rispetto a quello interno, che quindi aumentano il costo del sistema di estrazione.

Fig. 1.3 - Esempio della configurazione con scambiatore di calore esterno al solar pond destinato alla produzione di energia elettrica



Fonte: Szacs vay, Hofer-Noser, Posnansky (1999)

La particolare posizione in cui lo scambiatore esterno deve estrarre il fluido può creare zone morte che riducono l'efficienza del pond, per questo motivo la soluzione fredda va immessa sul fondo del pond e quella calda va estratta dal lato opposto, il più vicino possibile al limite superiore dello strato convettivo. Se la distanza fra l'interfaccia e il prelievo è troppo piccola o se la velocità di prelievo è troppo alta, si può verificare l'erosione della zona gradiente.

Analizzando i costi e le performance di entrambi i metodi, risulta che l'assenza dei problemi di corrosione e gestione, la semplice installazione e i costi più bassi del sistema di estrazione rendono lo scambiatore interno la soluzione migliore.

2 CALCOLO DELL'EFFICIENZA TERMICA

2.1. Input di radiazione solare

2.1.1. Trasmissione della luce solare in acqua

La radiazione solare una volta penetrata nell'interfaccia aria/acqua deve percorrere 1 o più metri per arrivare allo strato di fondo e fornire calore utile. Come già detto, la trasmissione della radiazione attraverso l'acqua è uno dei fattori critici per l'efficienza del solar pond. A causa delle particelle fini e ai microrganismi viventi che rimangono sospesi nel pond, la radiazione solare viene assorbita e deviata. Per ridurre al minimo questo effetto la manutenzione del pond e il mantenimento della trasparenza hanno un ruolo chiave.

Data una lunghezza d'onda λ , il coefficiente di trasmissione monocromatico $\tau(\lambda, d)$ della radiazione attraverso uno spessore d in acqua si calcola come:

$$\tau(\lambda, d) = \exp[-d/\delta(\lambda)] \quad (1)$$

dove $\delta(\lambda)$ è l'assorbanza (o lunghezza di attenuazione) dipendente dalla lunghezza d'onda.

L'assorbimento, lo scattering molecolare e lo scattering causato dalle particelle in sospensione provocano un'attenuazione della radiazione che si calcola con l'equazione 4.

La funzione di trasmissione precisa ed accurata è necessaria solo all'interno della zona gradiente, mentre per gli altri strati si può utilizzare una funzione semplificata ottenuta dividendo lo spettro in bande di lunghezza d'onda.

Da esperimenti condotti da Rabl e Nielsen sull'acqua di mare pulita (paragonabile all'acqua della maggior parte dei solar pond) la trasmissione è significativamente più bassa di quello dell'acqua pura. È chiaro poi che in regioni con condizioni climatiche particolarmente difficili (tempeste di sabbia o detriti) la trasmissione sarà inferiore anche alla funzione descritta da Rabl e Nielsen.

La radiazione solare è composta da un raggio diretto e da componenti diffuse. Per calcolarla vanno considerate l'angolo zenitale e azimutale, le caratteristiche dell'area, le condizioni del cielo e l'angolo solare. L'angolo di

incidenza dipende a sua volta dall'ora del giorno e dal giorno dell'anno secondo la formula:

$$\cos\theta_i = \cos L \cos D \cos(2\pi t_n/24) + \sin L \sin D \quad (2)$$

$$\sin D = \sin E \cos(2\pi t/365) \quad (3)$$

dove:

θ_i = angolo di incidenza;

L = latitudine;

D = inclinazione del sole;

E = inclinazione solare al solstizio estivo;

t = tempo in giorni dal 21 giugno.

Il raggio solare incidente sulla superficie del pond viene in parte riflesso nell'aria e parte trasmesso con un angolo di deviazione (rifrazione) θ_r dato dalla legge di Snell:

$$n_w \sin\theta_r = \sin\theta_i \quad (4)$$

dove n_w è l'indice di rifrazione dell'acqua.

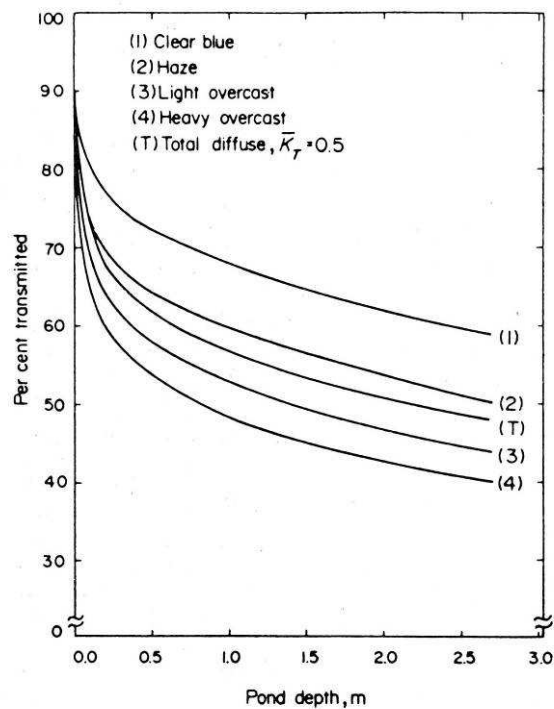
2.1.2. Radiazione diffusa e scattering

Siccome la trasmissione della radiazione attraverso l'acqua è fortemente dipendente dalla lunghezza d'onda, la componente diffusiva complica l'analisi termica dei solar pond. Questo succede perché la distribuzione spettrale della luce cambia enormemente secondo le condizioni del cielo e la copertura nuvolosa. Anche se molti ricercatori hanno deciso di ignorare il problema giustificandosi con il fatto che i modelli a priori hanno un campo di incertezza comunque ampio, può essere utile per comprendere la relazione fra variazioni nell'efficienza del pond e condizioni del cielo.

Nel modello della trasmissione della radiazione diffusa nei solar pond, l'aspetto chiave è l'assegnazione di un "colore di temperatura" alla componente diffusiva in base alle condizioni del cielo che vengono correlate con un indice di nitidezza K_T , in modo da calcolare l'energia a loro associata. Nella figura 2.1 si nota come la trasmissione della luce solare diffusa sembra migliore del raggio diretto, questo è dovuto al fatto che la componente diffusa ha una natura più blu.

Anche se lo scattering nell'acqua pura può essere trascurato, nel solar pond può andare ad influenzare la trasmissione della radiazione. Se il fenomeno di scattering è molto forte, tanto che il modello esponenziale di attenuazione del raggio non può essere usato, allora probabilmente il pond in questione ha bisogno di una pulizia straordinaria dell'acqua.

Fig. 2.1 - Energia incidente trasmessa in solar pond con acqua pura e per differenti condizioni meteo



Fonte: Hull, Nielsen, Golding, (1989)

Le prove di laboratorio condotte con celle di misurazione dell'assorbimento non sono veritiere, perché nel pond la luce riflessa con un piccolo angolo continua il suo percorso verso il basso. Così per determinare l'assorbimento (o attenuazione) in funzione della profondità, servono misure sul solar pond stesso.

Più l'angolo di uscita in avanti delle componenti dello scattering è piccolo, più la variazione della radiazione con la profondità sarà simile al caso in cui lo scattering è del tutto assente.

2.2. Modello a stato stazionario

Il modello a stato stazionario, per un dato pond operante, è in grado di fornire la misura dello spessore della zona gradiente necessario a produrre la massima efficienza. Dal modello si desume che un assottigliamento dello strato convettivo superiore (UCZ) causa una perdita di efficienza e che la performance termica è molto sensibile a cambiamenti nella trasparenza dell'acqua e nelle perdite di calore dal terreno. Lo strato superficiale assorbe la radiazione solare, ma contribuisce molto poco all'immagazzinamento del calore. Questo strato ha un comportamento convettivo e isotermico per una piccola frazione di gradi durante il periodo di raffreddamento superficiale, quando cioè il calore viene trasferito verso l'alto. Durante i periodi di forte riscaldamento, invece, il comportamento è non-convettivo. Dato che il calore viene trasferito verso l'alto per convezione, ma verso il basso soltanto per conduzione (comportamento non molto favorevole all'efficienza del pond), il suo spessore va mantenuto il più sottile possibile. Lo strato intermedio a gradiente non agisce semplicemente come isolante a temperatura uniforme. L'energia assorbita e condotta verso l'alto nella zona gradiente contribuisce al gradiente termico stesso, riducendo il gradiente all'interfaccia con la zona di fondo si riduce la conduzione che provoca la perdita di calore dalla zona di fondo e aumenta la temperatura operativa del pond.

La profondità z^m è la profondità ottimale di estrazione del calore. In quanto fornisce la temperatura operativa massima per un dato tasso di estrazione. A z^m si verifica che il calore assorbito nella zona gradiente è interamente responsabile del gradiente termico e tutta l'energia solare che arriva a questa profondità è disponibile per l'uso.

2.2.1. Analisi termica della zona gradiente

L'equazione generale mono-dimensionale per la temperatura (T) è:

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - I \tau(z) = C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5)$$

dove:

k = conduttività termica;

z = profondità;

I = irraggiamento;

$\tau(z)$ = frazione di I trasmessa alla profondità z;

C = capacità di calore per unità di volume;

t = tempo.

Applicata allo stato stazionario l'equazione 5 diventa:

$$k \frac{\partial T}{\partial z} - I \tau(z) = \text{cost} \quad (6)$$

Se si valuta la costante di integrazione in termini dei valori all'interfaccia dello strato di fondo z_2 si ottiene:

$$k \frac{dT}{dz} - I \tau(z) = k \left(\frac{dT}{dz} \right)_{z_2} - I \tau(z_2) \quad (7)$$

oppure:

$$\frac{dT}{dz} = (I/k) [\tau(z) - \tau(z_2)] + \left(\frac{dT}{dz} \right)_{z_2} \quad (8)$$

Il gradiente termico a qualsiasi livello entro lo strato intermedio è maggiore di quello all'interfaccia con lo strato di fondo e il termine $(I/k)[\tau(z) - \tau(z_2)]$ rappresenta il contributo al gradiente termico alla profondità z dato dalla radiazione assorbita fra z e z_2 .

Quando il gradiente termico all'interfaccia con lo strato di fondo è zero, la variazione di temperatura dipende solo dalla radiazione assorbita.

Il termine $\left(\frac{dT}{dz} \right)_{z_2}$ si riferisce al gradiente presente all'interfaccia della zona di fondo e può essere valutato considerando la conservazione dell'energia nella zona. Allo stato stazionario non c'è un flusso netto nel volume. Infatti il flusso dato dalla radiazione che entra nella zona attraverso il piano z_2 e viene assorbito è uguale al flusso di calore $k \left(\frac{dT}{dz} \right)_{z_2}$ che per conduzione si dirige verso l'alto fuori dalla zona di fondo sommato al flusso di calore perso dal terreno o rimosso dal sistema di estrazione. La somma dei termini di estrazione è indicata con $I\eta$, dove η rappresenta la frazione di flusso della radiazione incidente persa nel terreno o rimossa per estrazione dalla zona di fondo.

Considerando la conservazione dell'energia nella zona di fondo si ottiene l'equazione:

$$\left(\frac{dT}{dz} \right)_{z_2} = (I/k) [\tau(z_2) - \eta] \quad (9)$$

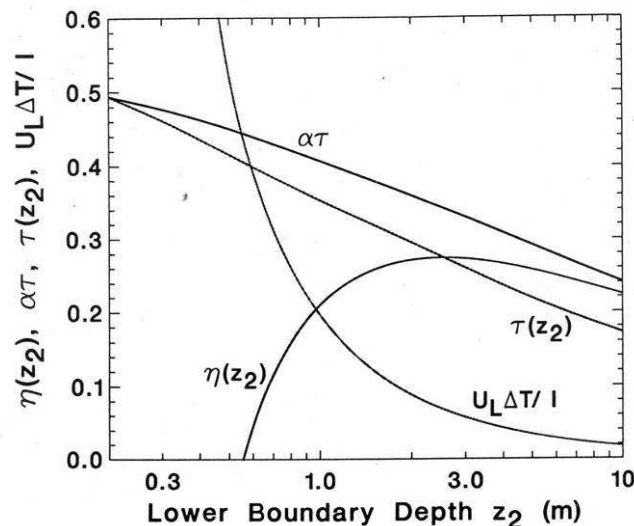
Combinando l'equazione 9 con la 8 si ottiene:

$$\frac{dT}{dz} = (I/k) \{ [\tau(z) - \tau(z_2)] + [\tau(z_2) - \eta] \} \quad (10)$$

Nell'equazione 10 i due termini $\tau(z_2)$ hanno un significato fisico differente. Il primo indica la porzione di gradiente termico attribuibile alla radiazione assorbita, mentre il secondo indica la porzione attribuibile al calore condotto verso l'alto fuori dalla zona di fondo ed entro la zona intermedia.

Per quanto riguarda l'efficienza termica (h_u) si ottiene separando il termine generico η nelle due frazioni $I \eta_g$ (tasso di calore perso dal terreno) e $I \eta_u$ (tasso di estrazione). Per ricavare il termine η lo si considera variabile e si tiene la temperatura all'interfaccia dello strato di fondo costante. Se ne ricava che η è dipendente dalla profondità z_2 , e che, per determinate condizioni operative, il valore massimo di $\eta(z_2)$ si ha alla stessa profondità del valore massimo nel profilo di temperatura. Come si vede anche in Fig. 2.2 il valore massimo di $\eta(z_2)$ si ha quando la funzione di trasmissione $\tau(z_2)$ interseca la curva $\eta(z_2)$. Se il calore viene estratto da un livello vicino al valore massimo di T per un dato η , il calore che si otterrà sarà alla T più alta possibile per il tasso di estrazione, e la profondità di estrazione sarà la profondità ottimale. In questo caso l'equazione 9 viene modificata per cui $(dT/dz)_{z_2} = 0$ e la frazione totale di calore rimosso è uguale alla frazione $\tau(z_2)$ della radiazione trasmessa nella zona di fondo. Se il coefficiente di trasmissione dell'acqua è basso, per lo stesso valore di η la profondità ottimale e la T massima saranno minori.

Fig. 2.2 - Andamento della frazione η rimossa in bade alla profondità dell'interfaccia di fondo z_2

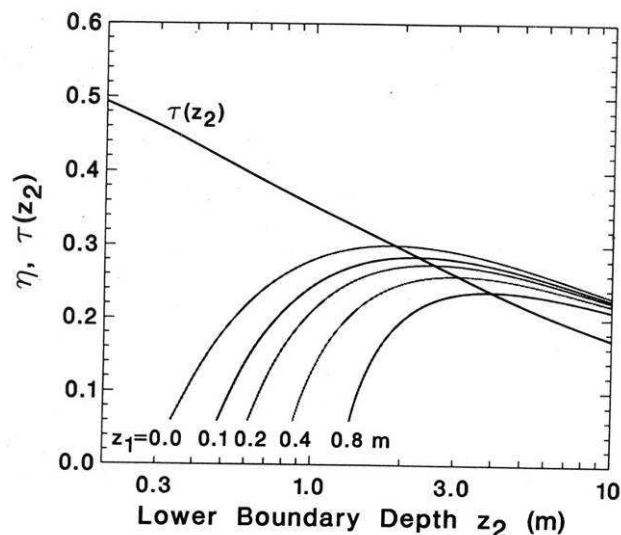


Fonte: Hull, Nielsen, Golding, (1989)

Quando il gradiente termico all'interfaccia con lo strato di fondo è zero non c'è perdita di calore verso l'alto, così si ha che tutta la radiazione ricevuta e

immagazzinata nello strato è disponibile per l'estrazione, ad eccezione della porzione persa dal terreno. È facile immaginare che per una performance migliore si deve mantenere il valore medio del gradiente termico all'interfaccia dello strato di fondo il più piccolo possibile. Ogni cambiamento nei parametri operativi, come l'angolo di incidenza o la qualità dell'acqua, che provoca una maggiore penetrazione della radiazione incidente porta ad un incremento della T massima per un dato η . La differenza di T, infatti cambia con un tasso molto simile a quello della penetrazione della radiazione solare. Inoltre anche altri parametri influenzano la performance termica. Il valore di k, per esempio, dipende dalla concentrazione del sale e dalla temperatura e quindi non può essere controllato dai tecnici, ma vale la pena tenere a mente che variazioni di k comportano risultati diversi sia per la temperatura che per l'efficienza, così come succede per la radiazione incidente e la distanza di penetrazione. Finora è stato considerato che lo strato superficiale avesse uno spessore z_1 costante, ma questo può non verificarsi nella realtà. Cambiamenti nella profondità dello strato superficiale provocano cambiamenti importanti sia per η che per ΔT (differenza fra la $T(z_1)$ e la T operativa a cui il calore viene estratto). Una ragione è che il flusso conduttivo è maggiore vicino alla superficie, così la variazione dello spessore z_1 , tenendo z_2 costante, provoca un cambiamento maggiore nel ΔT . Se ne ricava che l'altezza ottimale della zona superficiale è prossima allo zero, tanto che questo ha indotto a pensare che sarebbe meglio non avere affatto lo strato dolce. La relazione che intercorre fra la frazione rimossa η con ΔT costante è mostrata in Fig. 2.3 ed è calcolata per diversi valori di z_1 .

Fig. 2.3 - Andamento di η in funzione a z_2 per diversi spessori della zona superficiale (z_1)



Fonte: Hull, Nielsen, Golding, (1989)

Va notato che incrementando z_1 si verifica sempre una diminuzione di η , così che si rende necessario aumentare z_2 per annullare l'eccessivo calo che caratterizza η .

Il rendimento termico del solar pond può essere paragonato a quello di un collettore solare piano in cui l'efficienza è così calcolata:

$$q = \alpha\tau I - U_L \Delta T \quad (11)$$

dove:

q = energia rimossa o raccolta per unità di tempo e area;

α = assorbenza della superficie opaca;

τ = trasmittanza della massa trasparente;

U_L = coefficiente globale di trasmissione termica;

ΔT = differenza di T tra collettore e ambiente.

Il coefficiente di energia persa è dato da:

$$U_L = k(z_2 - z_1)^{-1} \quad (12)$$

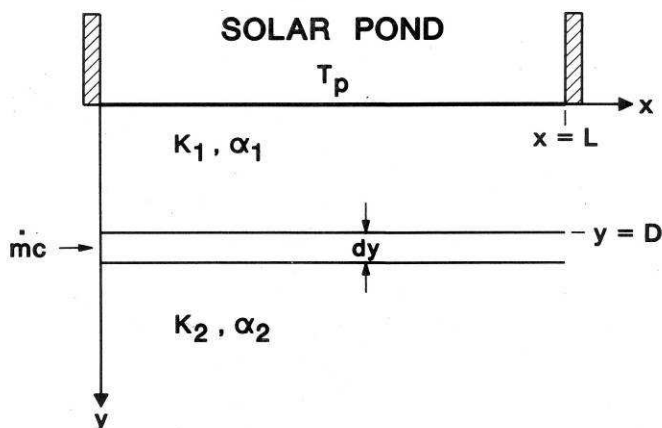
Bisogna tenere presente che in un solar pond l'input nella zona di fondo è proporzionale al termine $\tau(z_2)$ e non a $\alpha\tau$, e che il calore perso verso l'alto attraverso la zona intermedia non è proporzionale al coefficiente U_L a causa della curva del profilo di temperatura prodotto dalla radiazione assorbita.

Il modello a stato stazionario fornisce accurate valutazioni predittive sulla performance termica media annuale. Anche se, quando le condizioni operative sono in cambiamento, questo modello non fornisce una buona descrizione istantanea del profilo di T , la sua utilità rimane comunque alta per lo studio della variabilità dei parametri. Quando si progetta un solar pond, infatti, il primo passo da fare è quello di usare il modello a stato stazionario per stimare l'input solare e le risorse necessarie per il riempimento calcolati entrambi su scala annuale. Fatto questo, rimane poi da valutare la configurazione ottimale del pond.

2.2.2. Perdita di calore dal terreno ed efficienza

La differenza di T media tra la zona di fondo e l'ambiente alla quale il calore viene perso attraverso il terreno è la stessa del ΔT medio tra la zona di fondo e quella superficiale.

Fig. 2.4 - Geometria del processo di perdita del calore dal terreno



Fonte: Hull, Nielsen, Golding, (1989)

Nella Fig. 2.4 è rappresentata la geometria tipica del sistema usata per calcolare la perdita di calore dal terreno. Nel disegno la falda acquifera è presente ad una certa profondità D al di sotto del pond. Il coefficiente g di perdita del calore dal terreno, è calcolato assumendo che la falda è ad una temperatura costante secondo l'equazione:

$$g = (1/D + b P/A) k_g \quad (13)$$

dove:

b = costante ($0,5 < b < 1,4$);

P = perimetro del pond;

A = area superficiale del pond.

Un'importante valutazione è che pond con pareti laterali inclinate conservano il calore meglio rispetto a quelli con pareti verticali, anche se la superficie dei primi è doppia rispetto a quella dei secondi. Questo accade perché una significativa frazione del calore perso se ne va proprio dalle pareti laterali. Nei lati inclinati il percorso però è più lungo rispetto a quelli verticali, così risulta una perdita minore.

Un altro problema associato alla perdita di calore dal terreno è legato all'effetto del movimento della falda acquifera sull'efficienza del solar pond. Per flussi di falda orizzontali il problema di perdita dal fondo è equivalente a quello di un scambiatore di calore con pareti sottili. Considerando solo il termine di perdita di calore dal fondo (g), l'effetto del flusso idrico è:

$$g/g_{\max} = N[1 - \exp(-N)] \quad (14)$$

dove:

$$N = m cD/(k_g L) \quad (15)$$

dove:

g = coefficiente reale perdita di calore dal fondo;

g_{\max} = coefficiente teorico ricavato dalla eq. 13;

L = dimensione del pond parallelo alla direzione del flusso;

c = calore specifico dell'acqua;

m = flusso di massa per unità di ampiezza della falda.

2.2.3. Temperatura della zona superficiale

Il parametro $T(z_1)$ incontrato anche precedentemente, rappresenta la temperatura all'interfaccia fra la zona superficiale e quella a gradiente. È molto importante che il suo valore sia preciso, perché l'eventuale errore di misura si rifletterà con la stessa grandezza anche sulla T operativa, a cui il termine è legato nel ΔT (differenza fra la $T(z_1)$ e la T operativa a cui il calore viene estratto).

Se il solar pond opera con la quota dell'interfaccia della zona di fondo vicino o alla profondità ottimale, allora dall'equazione 9 si ricava che la frazione di calore rimosso η corrisponde alla frazione di energia solare $\tau(z_2)$ trasmessa a quella profondità. In questo caso la $T(z_1)$ superficiale non appare, per cui non può dar luogo ad errori.

Dato che la $T(z_1)$ non differisce mai per più di 6°C dalla temperatura ambientale media, è più che soddisfacente usare quest'ultimo termine al suo posto. Se però si volessero fare della relazioni più precise, la procedura più semplice è quella di misurare direttamente il parametro $T(z_1)$ attraverso sei osservazione giornaliere per un anno.

In alcuni casi però si ha l'esigenza di avere una modellizzazione più precisa, che permetta di stimare i tassi di evaporazione o raffreddamento del pond. Questa valutazione in genere viene fatta per pond situati in fasce climatiche particolari, che hanno un tasso di evaporazione significativo o in cui la $T(z_1)$ è minore della T ambientale o casi in cui la zona superficiale è usata come vasca di raffreddamento per cui avrà una $T(z_1)$ maggiore della T ambientale.

Anche se in realtà la zona superficiale non ha una temperatura uniforme durante il giorno (cambia l'esposizione solare), viene assunta come omogenea perché la sua stratificazione difficilmente supera pochi gradi.

Il **bilancio energetico** del modello stazionario è:

$$Q_s + Q_{cn} + Q_w + Q_h = Q_r + Q_{cv} + Q_e \quad (16)$$

dove:

Q_s = flusso di calore solare assorbito;

Q_{cn} = flusso di calore guadagnato per la conduzione della zona gradiente;

Q_w = flusso di calore guadagnato per l'apporto di acqua o pioggia;

Q_h = flusso di calore guadagnato da risorse ausiliari;

Q_r = flusso di calore perso per radiazione;

Q_{cv} = flusso di calore perso per convezione dell'aria;

Q_e = flusso di calore perso per evaporazione.

$$Q_s = I\tau_s [1 - \tau(z_1)] \quad (17)$$

$$Q_{cn} = k \frac{dT(z)}{dz} \Big|_{z_1} \quad (18)$$

$$Q_w = m_e c [T_w - T(z_1)] \quad (19)$$

dove:

m_e = tasso di massa dell'acqua aggiunta;

c = calore specifico dell'acqua;

T_w = T dell'acqua di bilancio.

I termini della parte destra dell'equazione 16 sono più difficili da calcolare. In particolare il parametro Q_e è oggetto di numerose ricerche. Per il solar pond si applica il modello ampiamente utilizzato per le riserve d'acqua (Eq. 21).

$$Q_r = \sigma \epsilon [T^*(z_1)^4 - T_s^*{}^4] \quad (20)$$

$$Q_e = [g(T_{vs} - T_{va})^{1/3} + bU_2](e_s - e_a) \quad (21)$$

$$Q_{cv} = CQ_e(T_s - T_a)/(e_s - e_a) \quad (22)$$

dove:

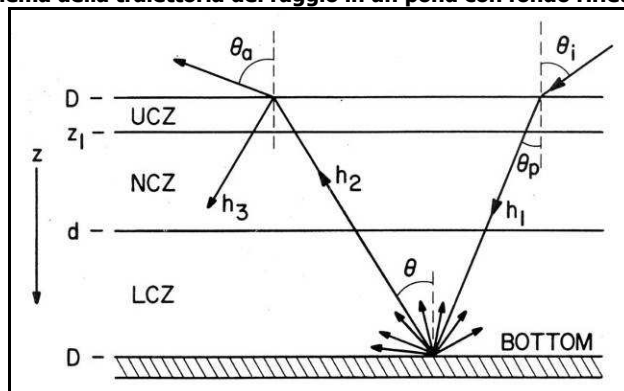
$\sigma = 5,68 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ (costante di Stefan-Boltzmann);

$\varepsilon = 0,97$ (emissione emisferica dell'acqua);
 $T_s = T$ del cielo (funzione di umidità e copertura nuvolosa);
 $*$ = temperatura espressa in gradi assoluti;
 $T_{vs} = T$ effettiva alla superficie;
 $T_{va} = T$ effettiva dell'aria;
 $U_2 =$ velocità del vento 2m sopra la superficie;
 $e_s =$ pressione del vapore saturo alla superficie;
 $e_a =$ pressione del vapore all'aria aperta;
 $C = 0,61$ mbar/K.

2.2.4. Riflessività del fondo

Il fatto che l'immagine del sole non è visibile sul fondo, dimostra che esso riflette in modo diffusivo. Nella Fig. 2.5 viene mostrata un diagramma schematico delle traiettorie dei raggi ($h_1 =$ raggio solare iniziale, $h_2 =$ raggio riflesso una volta e $h_3 =$ raggio riflesso più volte). L'effetto della riflessività del fondo sulla performance del pond è stato stimato da Hull. Nei suoi studi Hull ha trovato che il prodotto $\sigma\tau$ decresce significativamente all'aumentare della riflessività (R). Allo stesso modo anche la frazione di calore estratto η , con ΔT costante, diminuisce. Nell'applicazione pratica la perdita di calore legata alla riflessività deve essere molto piccola, tanto che, nei casi in cui l'acqua del pond è particolarmente trasparente, si possono mantenere alcune particelle in sospensione in modo da far aumentare l'assorbimento della zona di fondo.

Fig. 2.5 - Schema della traiettoria del raggio in un pond con fondo riflettente



$h_1 =$ raggio solare iniziale; $h_2 =$ raggio riflesso una volta; $h_3 =$ raggio riflesso più volte

Fonte: Hull, Nielsen, Golding, (1989)

3 MANTENIMENTO DELLA TRASPARENZA

3.1. Il problema della trasparenza: stato dell'arte

Le principali operazioni di manutenzione riguardano il mantenimento della trasparenza, la gestione del sale e il mantenimento del gradiente salino. In questo capitolo prenderemo in esame il primo aspetto.

Il problema della trasparenza nasce dal fatto che altrimenti la radiazione solare verrebbe assorbita dai corpi estranei eventualmente presenti e non arriverebbe sul fondo, facendo fallire così tutto il sistema di immagazzinamento del calore. I problemi maggiori vengono causati dalla crescita algale e/o microbica e dall'introduzione accidentale di corpi estranei come foglie, fango, insetti o altro. Fino agli anni '90 si sono usati prevalentemente trattamenti chimici, ispirati alle procedure di pulizia delle piscine, quindi per lo più composti di cloro o di rame addizionati con alghicidi. Anche se è consigliabile avere sempre Cl o Cu in eccesso perché alghe e batteri hanno dei cicli di crescita molto rapidi che vanno prevenuti, bisogna sempre monitorare la loro concentrazione in quanto non è ottimale avere troppo cloro o rame in forma libera nel pond.

I detriti di vario genere che finiscono nel pond galleggiano sulla superficie per diversi giorni. Il metodo migliore per rimuoverli è l'utilizzo di schiumatori che fanno depositare le particelle sul fondo con una velocità che dipende dalla grandezza della particella stessa. Se i detriti sono piccoli rimangono sospesi nella zona gradiente (NCZ), a causa della crescente densità, e sono rimossi o tramite l'uso di un agente flocculante (es. alum) oppure aspirando e filtrando lo strato dove è intrappolato il detrito. Dato che è preferibile non lavorare sulla zona gradiente perché il rischio è quello di instaurare moti convettivi, ove possibile è sempre meglio eliminare i detriti dalla superficie. Un'altra tecnica consiste nell'aggiunta di particelle in superficie che si agglomerano ai detriti presenti causando co-precipitazione di entrambi e, se si usano particelle di carboni attivi, si ha anche il vantaggio di ridurre la riflettività superficiale.

Dato che i trattamenti chimici lasciano comunque componenti residui che possono creare problemi di instabilità del sistema, negli ultimi anni si è rivolta l'attenzione su tecniche più naturali. Un metodo di controllo naturale consiste nell'introduzione sulla superficie di un gamberetto trasparente di 1 cm (detto brine shrimp) che filtra continuamente l'acqua ed espelle le alghe e i nutrienti ingeriti sotto forma di pellet compatti che precipitano sul fondo. Questa tecnica

è stata sperimentata con successo in Israele nel solar pond di Bet Ha Arava e in Australia, ma presenta un inconveniente. Nel pond provvisti di liner, infatti, le uova del gamberetto non riescono ad ancorarsi ai bordi e cadono nella zona inferiore dove, a causa delle alte temperature, muoiono. Al contrario funzionano bene in pond senza liner, perché le uova restano attaccate grazie alle irregolarità del terreno. Considerando che nella maggior parte dei casi l'installazione del liner si rende necessaria, l'applicabilità del metodo rimane ridotta.

Inoltre, un'importante componente in grado di influenzare in maniera significativa la trasparenza dell'acqua è rappresentata dalle comunità microbiche presenti nel solar pond. Tali sistemi sono noti ospitare elevate abbondanze di microrganismi quali Procarioti (Batteri ed Archaea) ed Eucarioti (i.e. protisti, fitoplancton e zooplancton). Inoltre, nei solar pond si riscontrano, analogamente ad altri ambienti iper-salini naturali, anche elevate abbondanze di virus. Tutte queste componenti biotiche presentano complesse dinamiche stagionali, che possono determinare ampie fluttuazioni nelle loro abbondanze. Inoltre, è noto che tali organismi possono influire in maniera negativa sulla trasparenza dei solar pond. Di conseguenza, la componente biologica deve, analogamente ai parametri chimico-fisici, essere attentamente monitorata al fine di una corretta ed integrata gestione del sistema solar pond.

A fronte di tali problematiche, l'obiettivo della presente sperimentazione era di testare metodi di trattamento per l'abbattimento del carico di solidi sospesi dalla colonna d'acqua di sistemi solar pond. In particolare, lo studio ambiva all'aggiunta di un flocculante (PAC o Policlorigli di Alluminio) in soluzione nello strato intermedio (NCZ) del solar pond per simulare la manutenzione di un impianto in funzione, in maniera da risolvere problemi causati da un'elevata torbidità negli strati superficiali che, come già detto, portano ad una minore efficienza del sistema. La ricerca mira a implementare studi precedenti, i quali hanno dimostrato l'efficacia dell'utilizzo di PAC allo stato solido, senza tuttavia individuare la concentrazione minima efficace. In questo studio sono quindi stati effettuati esperimenti di aggiunta di PAC nello stato liquido e a diverse concentrazioni, in modo da poter ricavare la concentrazione minima efficace per una data concentrazione di solidi sospesi.

Tale ricerca, condotta in situazioni estremamente differenti dal punto di vista biologico, permette inoltre di valutare, per la prima volta, il ruolo giocato dalla componente microbica nelle pratiche di abbattimento della trasparenza dei solar pond.

3.2. Materiali e Metodi

3.2.1. Sito di studio ed attività di campionamento

Lo studio è stato condotto nel solar pond dell'Università Politecnica delle Marche, sito in località Aspigo di Ancona, all'interno dell'area sperimentale "Laboratorio delle energie rinnovabili". Il pond è profondo 3,5 m, ha una lunghezza laterale superficiale di 25 m e al fondo di 11 m, per una superficie di 620 m². All'interno dell'invaso all'atto del riempimento è stata introdotta una quantità di circa 900.000 kg di sale sfuso di grossa granulometria, non purificato, proveniente dalle saline di Stato di Margherita di Savoia, nel Gargano (Puglia) attraverso autoarticolati. Il sale è stato introdotto nell'invaso con l'ausilio di escavatori e nastro trasportatore e successivamente diluito con acqua di acquedotto. La superficie totale dell'area sperimentale è di 5000 m². Il sistema, costruito nel 1985, è stato oggetto di attività di ricerca di diverso tipo, che hanno mantenuto il solar pond in continuo funzionamento fino a qualche anno fa. Pertanto per un periodo di due o tre anni il sistema è stato lasciato alla deriva senza processi manutentivi. Quando nel mese di Aprile 2008 è stato effettuato il primo campionamento, il sistema presentava delle problematiche piuttosto importanti, sia in termini di torbidità che di gradiente salino. Le condizioni dell'acqua erano quindi critiche dal punto di vista dell'efficienza del sistema, ma allo stesso tempo ideali per gli aspetti presi in esame nella presente tesi, in quanto rappresentativi di cattive condizioni realmente verificabili in sistemi di tipo solar pond.

La sperimentazione è stata condotta utilizzando campioni prelevati dal solar pond in data 10 Aprile 2008 e 4 Settembre 2008. I due periodi sono stati scelti in quanto rappresentativi di due differenti condizioni nei parametri biologici del solar pond. In Aprile, infatti, il solar pond presentava condizioni piuttosto regolari e una stratificazione salina (Fig. 3.1). Erano evidenti elevate abbondanze del crostaceo *Artemia salina* (*phylum* Arthropoda; Fig. 3.2). Al contrario, durante il campionamento di Settembre, era evidente un colore rosso mattone dell'acqua (Fig. 3.3). Analisi condotte sul campione raccolto, effettuate per mezzo di un microscopio ottico inverso, rivelavano la presenza di un *bloom* di cianobatteri fotoautotrofi (*phylum* Cyanobacteria), responsabile del cambiamento di colore (Fig. 3.4). Questo fenomeno ha dunque permesso di investigare trattamenti volti all'abbattimento della materia totale sospesa (TSM) in differenti condizioni del sistema. In tal senso sono state dunque considerate

due situazioni tipo: invernale (assenza di *bloom* microalgali o di cianobatteri) ed estiva (presenza di bloom).

Fig. 3.1 - Solar pond sperimentale di Ancona nel mese di Aprile (situazione invernale)



Fonte: foto P. Principi

Fig. 3.2 - Il crostaceo *Artemia salina* (Linnaeus, 1758) riscontrato in elevate abbondanze nel solar pond durante il campionamento di Aprile



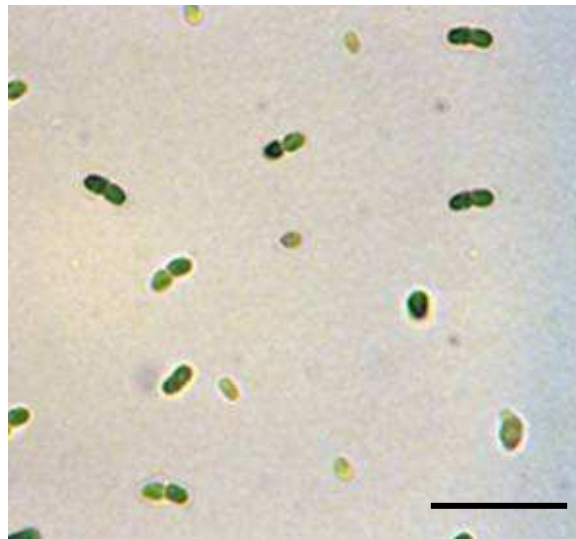
Fonte: foto G.M. Luna tramite microscopio

Fig. 3.3 - Solar pond sperimentale di Ancona durante il campionamento di Settembre. E' evidente il colore rosso dell'acqua, in conseguenza del bloom di Cianobatteri



Fonte: foto B. Torres

Fig. 3.4 - Cellule di Cianobatteri osservate nel solar pond nel mese di Settembre. Dimensioni della barra: 20 μm



Fonte: foto G.M. Luna tramite microscopio

Per entrambi gli scenari sono stati condotti gli stessi trattamenti sperimentali e si sono analizzate le differenze, in modo da stabilire se l'azione

del flocculante sia efficace anche sulla componente organica e biologica, o se invece differenti condizioni biologiche del solar pond necessitino di trattamenti mirati.

I campioni sono stati raccolti dal solar pond utilizzando contenitori in polipropilene della capacità di 10 Litri. Una volta raccolti, i campioni sono stati conservati in cella frigorifera al buio a + 4 °C

3.2.2. Fase sperimentale: instaurazione del gradiente

Il lavoro sperimentale si è basato su microcosmi artificiali, costituiti da *beaker* in vetro della capacità di 2000 cm³. In ogni microcosmo sono state mimate in scala le condizioni di stratificazione tipiche di un solar pond. I microcosmi sono stati utilizzati per testare le diverse tipologie di trattamento mediante flocculante.

Per ricreare il gradiente tipico del pond, è stata utilizzata la tecnica Zangrando, consistente nella produzione di soluzione sovrasatura di sale in acqua e successiva aggiunta di acqua dolce con un diffusore a vari livelli in profondità, con lo scopo di instaurare uno strato a gradiente nella zona centrale della massa liquida. Per riprodurre le condizioni reali del solar pond di Ancona come soluzione satura è stata utilizzata quella prelevata dal pond e su quella è stata poi applicata la pratica di riempimento. Per entrare in possesso della tecnica sono state effettuate prove prima delle quali è stata calcolata la salinità dell'acqua del pond e quella da raggiungere, così da ricavare la quantità di sale (NaCl) necessaria. Utilizzando una piastra riscaldante a 80 °C vi è stato posizionato sopra il *beaker* contenente 1400 ml di acqua del pond e 202,80g di NaCl (misura ricavata dai calcoli suddetti) per i campioni di Aprile e 192 g per quelli di Settembre, agitando fino al completo scioglimento del sale. Gli strati superiori sono stati creati successivamente addizionando acqua deionizzata attraverso un diffusore mobile.

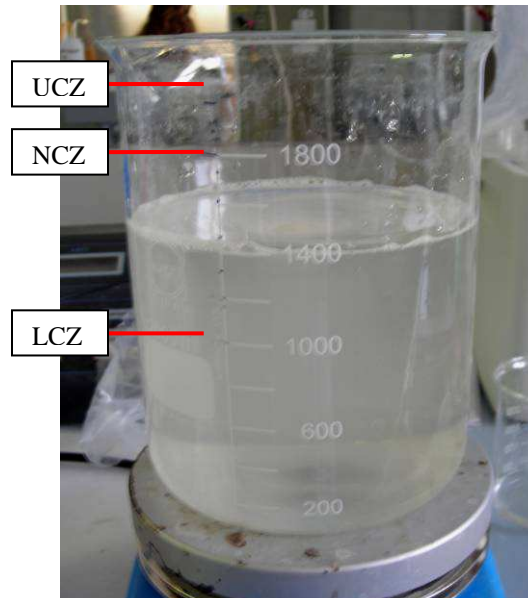
Lo schema seguito per l'instaurazione del gradiente salino è stato il medesimo per tutte le prove di laboratorio effettuate. Di seguito è riportato il protocollo adottato (Fig. 3.5 - 3.10).

**Fig. 3.5 - Fase 1 – Calcolare la quantità di sale necessaria e pesarla su bilancia analitica.
In foto: Pesata del sale (NaCl)**



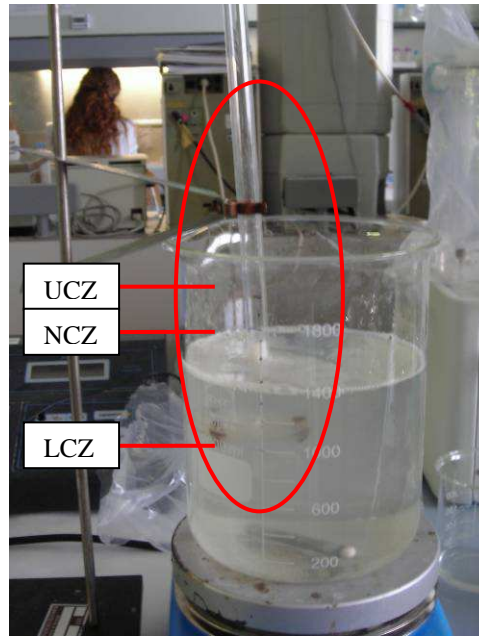
Fonte: foto B. Torres

Fig. 3.6 - Fase 2 – Riempire con l'acqua prelevata dal pond fino alla metà della zona gradiente; riscaldare e mescolare fino al scioglimento del sale. In foto: Zona convettiva superiore (UCZ), zona a gradiente (NCZ) e zona convettiva inferiore (LCZ)



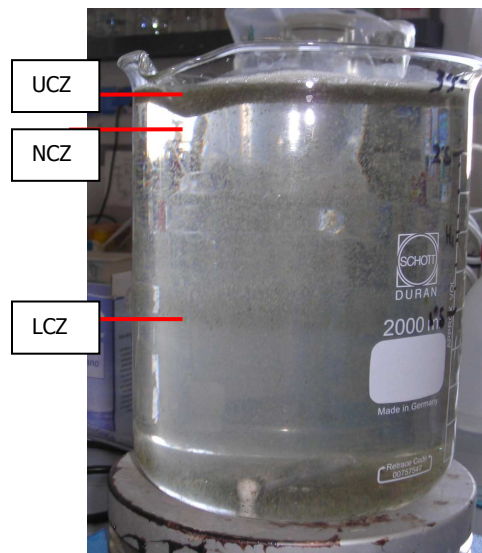
Fonte: foto B. Torres

Fig. 3.7 - Fase 3 – Mediante il diffusore mobile, immettere acqua deionizzata fino a far salire il livello dell'acqua di 1 cm. Poi alzare il diffusore di 2 cm e ripetere l'operazione. In foto: in rosso è evidenziato il diffusore mobile posto all'interfaccia fra le zone Non Convective Zone (NCZ) e Lower Convective Zone (LCZ)



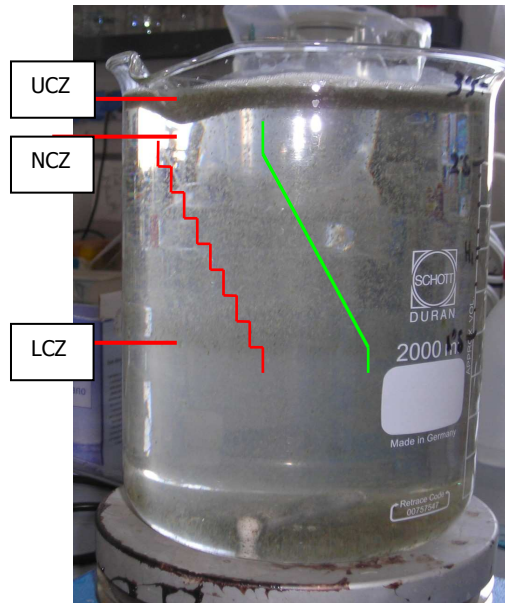
Fonte: foto B. Torres

Fig. 3.8 - Fase 4 – Riempire seguendo la modalità indicata nella Fase 3 fino a quando il livello dell'acqua e del diffusore non combaciano. In foto: gradiente salino formato. Upper Convective Zone (UCZ), Non Convective Zone (NCZ) e Lower Convective Zone (LCZ)



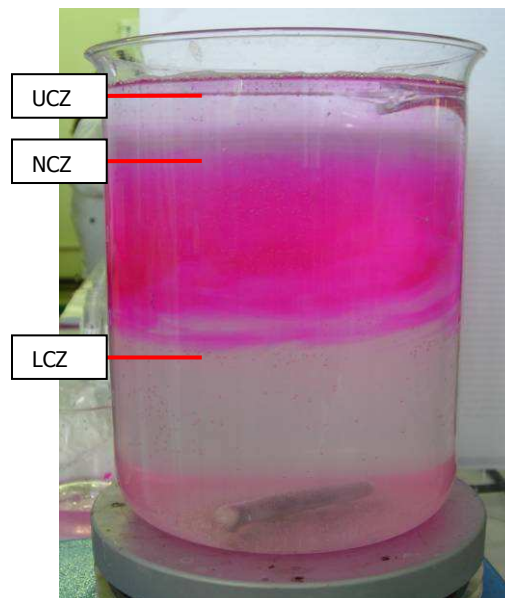
Fonte: foto B. Torres

Fig. 3.9 - Fase 5 – Il gradiente così formato è del tipo (rosso) mostrato in figura. Per ottenere il profilo corretto (verde) riscaldare mediante la piastra a 80°C. In foto: gradiente salino formato. Sono visibili i due profili di salinità prima e dopo il riscaldamento. Upper Convective Zone (UCZ), Non Convective Zone (NCZ) e Lower Convective Zone (LCZ)



Fonte: foto B. Torres

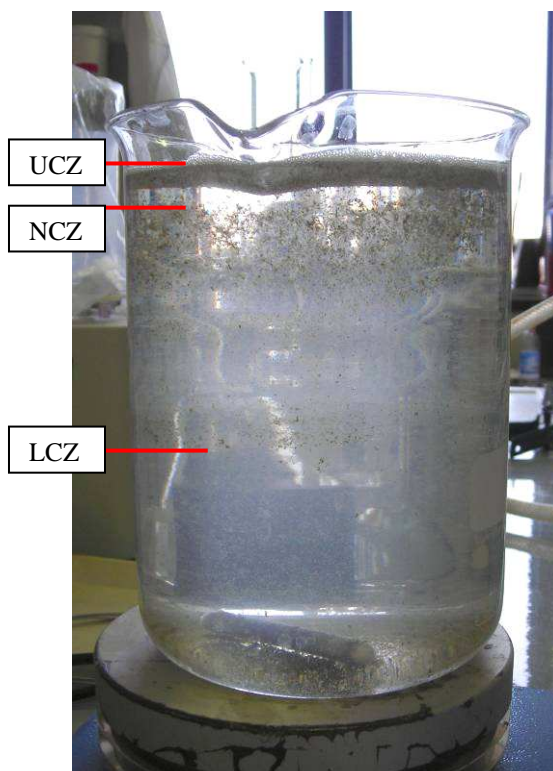
Fig. 3.10 - Fase 6 – Utilizzo del colorante rosa bengala per evidenziare la divisione delle tre zone. In foto: Upper Convective Zone (UCZ), Non Convective Zone (NCZ) e Lower Convective Zone (LCZ)



Fonte: foto B. Torres

Un esempio di microcosmo costruito con l'acqua prelevata dal pond di Ancona è mostrato in Fig. 3.11.

Fig. 3.11 - Esempio di microcosmo ricreato in laboratorio per la situazione invernale. Sono visibili i tre strati composti da acqua a differente salinità: Upper Convective Zone (UCZ), Non Convective Zone (NCZ) e Lower Convective Zone (LCZ)



Fonte: foto B. Torres

3.2.3. Sperimentazione dei trattamenti in microcosmo

Per ognuna delle due situazioni (invernale ed estiva) sono state condotte le medesime prove di trattamento. Sono stati ricreati in laboratorio differenti microcosmi, i quali sono quindi stati utilizzati per effettuare i successivi trattamenti di aggiunta del flocculante.

La procedura sperimentale condotta in entrambe le situazioni è stata la medesima. E' stato inizialmente allestito un microcosmo al fine di simulare le condizioni tipiche di un pond in microscala. Questo microcosmo (definito "Controllo") è stato campionato per i parametri descritti di seguito, al fine di ottenere dati di confronto rispetto agli altri microcosmi in cui sono stati effettuati i trattamenti.

Sono stati effettuati quattro esperimenti di aggiunta di flocculante. Nel primo esperimento ("Prova 1") sono stati aggiunti, nello strato intermedio del microcosmo, 50 ml di una soluzione di PAC liquido alla concentrazione dell'8,5% di Al_2O_3 in soluzione acquosa. In questo modo, la concentrazione di PAC all'interno dello strato equivaleva allo 0,53% di Al_2O_3 . La soluzione di PAC era del tipo REVA-FLOCK®, un prodotto disponibile in commercio per il trattamento di piscine ed altri sistemi. Il secondo esperimento ("Prova 2") è stato condotto in maniera analoga, addizionando tuttavia una quantità minore di flocculante (25 ml, per una concentrazione finale dello 0,27% di Al_2O_3). Per il terzo esperimento ("Prova 3") sono stati aggiunti 12,5 ml per una concentrazione finale dello 0,13% di Al_2O_3 , mentre nel quarto esperimento ("Prova 4") ne sono stati addizionati 6,25 ml per una concentrazione finale di 0,07% di Al_2O_3 . In seguito all'aggiunta del flocculante, i microcosmi sono stati campionati a distanza di un'ora dal trattamento. Per valutare l'efficacia di ogni trattamento, sono stati misurati la torbidità, la materia particellata sospesa e la concentrazione dei pigmenti fotosintetici particellati.

3.2.4. Analisi della torbidità

Sono state effettuate analisi spettrofotometriche volte alla determinazione della torbidità dei singoli strati. Le misure sono state condotte allo spettrofotometro (Fig. 3.12) in accordo al metodo "Torbidimetrico" descritto da APAT-IRSA (2003). In base ad esso, la torbidità (definita come "la riduzione della trasparenza di un campione, dovuta alla presenza di sostanze in sospensione") viene determinata valutando l'entità dell'assorbimento prodotto dalla fase dispersa sul fascio incidente, effettuando la misura nella stessa direzione del raggio incidente. Il protocollo prevede la misura dell'assorbanza del campione alla lunghezza d'onda di 440 nm.

La lettura spettrofotometrica è stata effettuata utilizzando acqua deionizzata come bianco e nello spettro compreso fra 250 nm e 750 nm in maniera da analizzarne il comportamento sia nel campo del visibile che dell'UV. In particolare si è registrata l'eventuale presenza di picchi nello spettro e le misure di assorbanza alle specifiche lunghezze d'onda di 250 nm, 440 nm, 630 nm e 750 nm,. Sono stati effettuati prelievi da 20 ml nella quota superficiale (definita "q3"), intermedia ("q2") e di fondo ("q1") in singola replica. Da ogni campione sono stati prelevati 3 ml e trasferiti in una cuvetta di quarzo (2 facce trasparenti) per la lettura.

La lettura spettrofotometrica è stata effettuata utilizzando acqua deionizzata ed esente da torbidità (ottenuta mediante filtrazione a $0.2 \mu\text{m}$) come bianco.

Fig. 3.12 - Spettrofotometro Jasco utilizzato per l'analisi della torbidità



Fonte: foto B. Torres

3.2.5. Analisi della materia particellata sospesa (TSM)

Sono state effettuate analisi volte alla determinazione della materia particellata sospesa, sia organica che inorganica. A tal fine, sono stati effettuati prelievi da 50 ml nella quota superficiale (definita "q3") in singola replica e prelievi in duplicato dalle quote intermedia ("q2") e di fondo ("q1"). L'acqua è stata quindi filtrata, mediante pompa da vuoto (Millipore), su filtri di tipo GF/F (*Glass Fiber Filter*, Whatman) aventi diametro di 24 o 47 mm. Un esempio di filtri ottenuto dalla filtrazione delle differenti quote è mostrato in Fig. 3.13. I filtri erano stati precedentemente calcinati in muffola a 450°C per 4 ore, al fine di eliminare eventuali tracce di materia organica. In seguito alla filtrazione, ogni campione è stato posto in forno a 60°C per 24 ore ed accuratamente pesato su una bilancia analitica.

Fig. 3.13 - Aspetto dei filtri GF/F in seguito a filtrazione di alcuni dei campioni analizzati



Fonte: foto B. Torres

Infine, ogni filtro è stato posto in muffola a 450°C per 4 ore e pesato di nuovo. In questo modo, è stato possibile stimare sia la frazione inorganica, che quella organica, come segue:

$$\left. \begin{array}{l} \text{TSM} = \text{Totale particellato sospeso} \\ \text{TIM} = \text{Totale particellato sospeso inorganico} \\ \text{TOM} = \text{Totale particellato sospeso organico} \end{array} \right\} \boxed{\text{TOM} = \text{TSM} - \text{TIM}}$$

I dati ottenuti sono stati espressi come mg/l.

3.2.6. Analisi dei pigmenti fotosintetici particellati (clorofilla-a e feopigmenti)

Sono state effettuate analisi spettrofotometriche volte alla determinazione del contenuto di pigmenti fotosintetici particellati. Le analisi erano volte alla determinazione sia del contenuto di clorofilla-a che di feopigmenti. Negli ambienti acquatici, la misura della clorofilla-a viene utilizzata come indicatore di biomassa autotrofa, in quanto rappresenta il pigmento indispensabile per il processo di fotosintesi per tutti gli organismi autotrofi. A pH acido la clorofilla-a perde l'atomo di magnesio dal nucleo porfirinico e si converte con rapporto stechiometrico in feofitina-a. L'uso di appropriate equazioni permette successivamente di calcolare le concentrazioni nel campione sia della clorofilla a che della somma dei prodotti di degradazione spettralmente simili (feofitina a e feoforbide a) indicati complessivamente come "feopigmenti". Per questi ultimi, è

stato necessario acidificare l'estratto, come di seguito descritto. Sono stati effettuati prelievi da 50 ml nella quota superficiale (definita "q3") in singola replica e prelievi in duplicato dalle quote intermedia ("q2") e di fondo ("q1"). I filtri sono stati posti all'interno di provette, addizionati con 0.1 g di carbonato di magnesio ($MgCO_3$) e 5 ml di acetone al 90% e vigorosamente agitati tramite vortex (Fig. 3.14).

Fig. 3.14 - Allestimento del materiale necessario per l'analisi del contenuto in pigmenti fotosintetici nei campioni del solar pond



Fonte: foto B. Torres

Le provette sono state quindi incubate al buio a 4 °C per 24 ore. Al termine dell'incubazione, le provette sono state centrifugate (2400 RPM, 10 minuti) ed il sovranatante analizzato tramite spettrofotometro (Jasco).

La lettura spettrofotometrica è stata effettuata alle lunghezze d'onda di 665 nm e 750 nm, e utilizzando l'Acetone al 90% come bianco.

Da ogni campione sono stati prelevati 3 ml di sovrinatante e trasferiti in una cuvetta di quarzo (2 facce trasparenti) per la lettura. La lettura è stata effettuata prima e dopo acidificazione in cuvetta (per aggiunta di 200 μ l di una soluzione di HCl [0.1 N], lasciato reagire per 20 secondi). La misura di assorbanza è stata quindi convertita in μ g/L di clorofilla-a attraverso un'apposita formula di conversione.

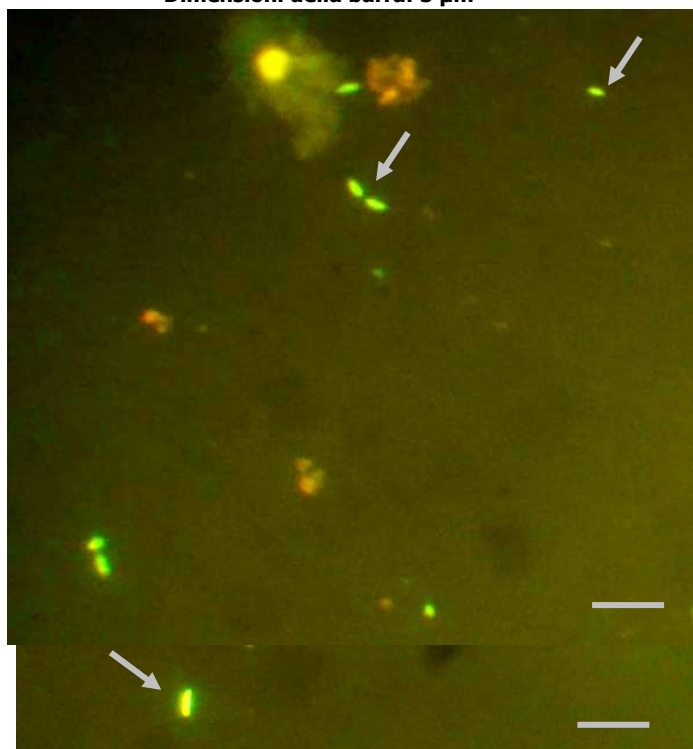
3.2.7. Analisi statistiche

L'analisi della varianza (ANOVA) è stata utilizzata per valutare l'effetto dei trattamenti di aggiunta di flocculante (PAC) sui parametri misurati (TSM, clorofilla-a, torbidità, abbondanze procariotiche e virali). Le analisi sono state condotte utilizzando il software GMAV 5.0 (Università di Sidney, Australia).

3.2.8. Analisi microbiologiche

L'abbondanza procariotica totale (Batteri + Archaea) e l'abbondanza virale totale sono state stimate mediante microscopia in epifluorescenza (Fig. 3.15), previa colorazione con il fluorocromo SYBR Green I (Molecular Probes), in accordo al protocollo descritto da Noble & Fuhrman. Le abbondanze totali procariotiche e virali sono state espresse come cellule L^{-1} e VLP (*Virus Like Particles*) L^{-1} , rispettivamente.

Fig. 3.15 - Esempio di cellule procariotiche riscontrate nei campioni investigati.
Dimensioni della barra: 5 μm



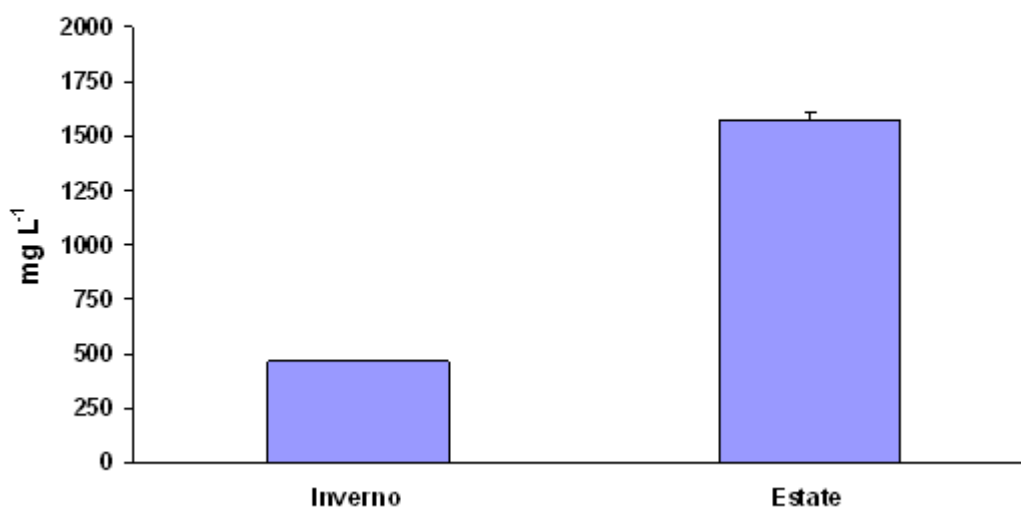
Fonte: foto G.M. Luna tramite microscopio

3.3. Risultati

3.3.1. Caratterizzazione del solar pond

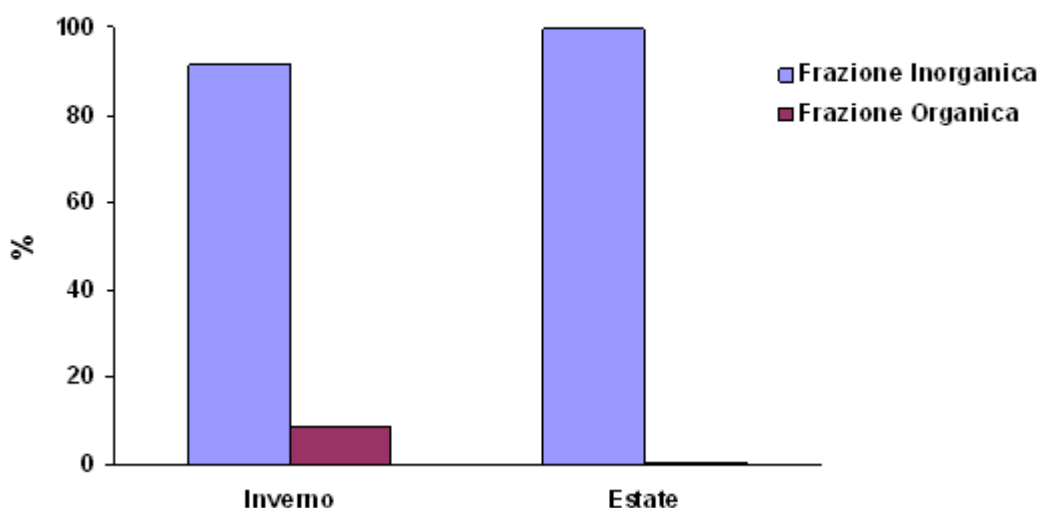
I campioni prelevati dal solar pond in Aprile (Inverno) e Settembre (Estate) 2008 erano caratterizzati da concentrazioni di materia totale particellata (TSM) pari a 465 ± 1 e 1573 ± 36 mg L⁻¹, rispettivamente (Fig. 3.16). Dunque, i valori di TSM erano ca. 3 volte superiori nel campione di Settembre (in presenza del *bloom* di cianobatteri) rispetto a quello di Aprile. La frazione organica era costituita dal 9% nel primo campione e dallo 0,5% nel secondo (Fig. 3.17). Al contrario, la frazione inorganica rappresentava la frazione dominante in entrambi (91% e 99,5% rispettivamente; Fig. 3.17).

Fig. 3.16 - Materia totale particellata (organica ed inorganica) misurata nel pond nei due campioni investigati



Fonte: elaborazione dei dati di campionamento

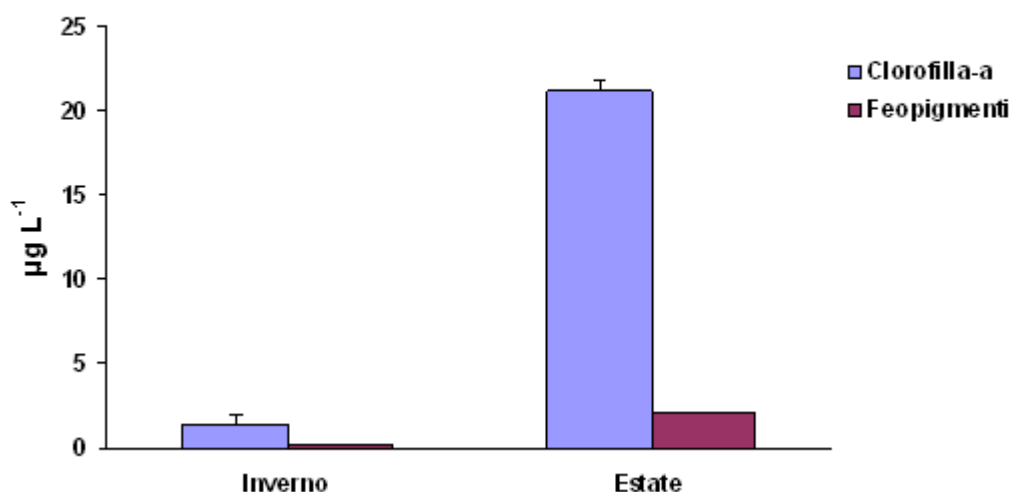
Fig. 3.17 - Percentuale di materia totale particellata organica ed inorganica misurate nel solar pond nei due campioni investigati



Fonte: elaborazione dei dati di campionamento

La concentrazione di pigmenti fotosintetici totali (clorofilla-a e feopigmenti) era di $2,1 \pm 0,3 \mu\text{g L}^{-1}$ nel campione di Aprile e $22,1 \pm 4,5 \mu\text{g L}^{-1}$ in quello di Settembre (Fig. 3.18). La concentrazione di clorofilla-a era sempre maggiore (range 7 – 10 volte) della concentrazione di feopigmenti (Fig. 3.18). Inoltre, la concentrazione di clorofilla-a era ca. 10 volte maggiore nel secondo campione rispetto al primo (Fig. 3.18), in conseguenza del *bloom* di Cianobatteri osservato nel campionamento di Settembre.

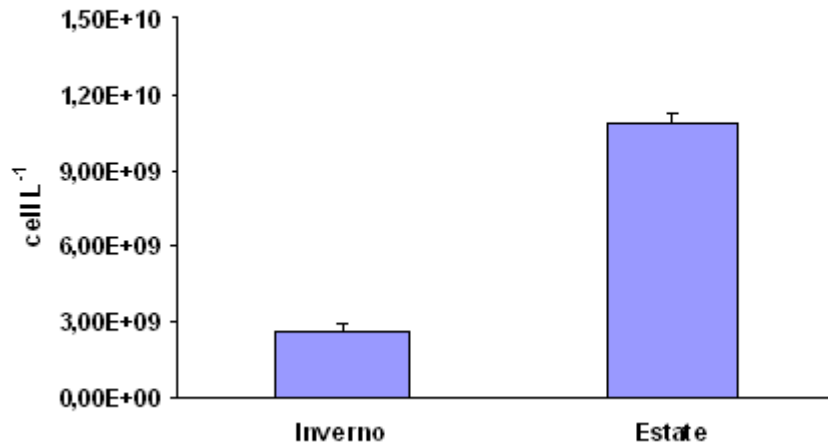
Fig. 3.18 - Concentrazione di pigmenti fotosintetici (clorofilla-a e feopigmenti) nel solar pond nei due periodi investigati



Fonte: elaborazione dei dati di campionamento

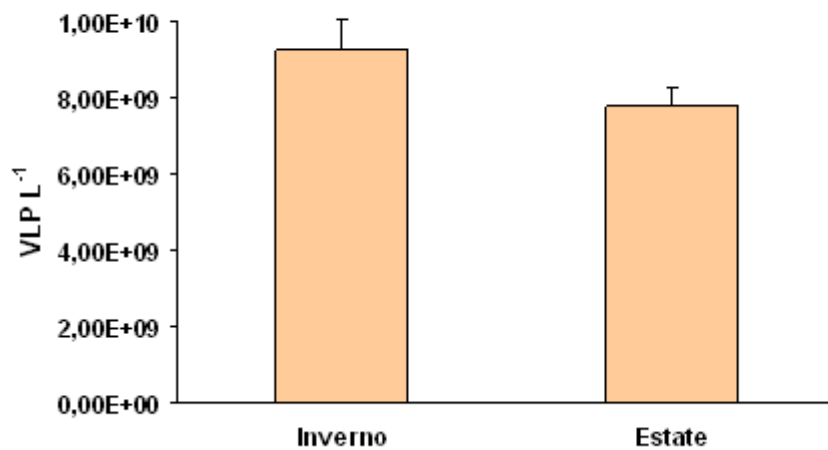
Le abbondanze totali di procarioti e di virus (VLP, definiti come *Virus Like Particles*) nei campioni prelevati dal solar pond sono mostrate in Fig. 3.19 e 3.20, rispettivamente. L'abbondanza di Procarioti totali era di $2,65 \pm 0,30 \times 10^9$ cell L⁻¹ in Inverno e $10,8 \pm 0,38 \times 10^9$ cell L⁻¹ in Estate (Fig. 3.19). Era evidente un notevole incremento dell'abbondanza totale di procarioti dall'inverno all'estate, in conseguenza dell'avvenuto *bloom* di Cianobatteri. Al contrario, l'abbondanza virale mostrava un decremento passando dalla situazione invernale ($9,25 \pm 0,83 \times 10^9$ VLP L⁻¹) a quella estiva ($7,78 \pm 0,46 \times 10^9$ VLP L⁻¹; Fig. 3.20).

Fig. 3.19 - Abbondanza procariotica totale nel solar pond nei due periodi investigati



Fonte: elaborazione dei dati di campionamento

Fig. 3.20 - Abbondanza virale totale nel solar pond nei due periodi investigati



Fonte: elaborazione dei dati di campionamento

Fig. 3.21 - Stadi larvali di Oligoneotteri (phylum Arthropoda) riscontrati nel solar pond nel mese di Settembre. Dimensioni della barra: 0,1 mm



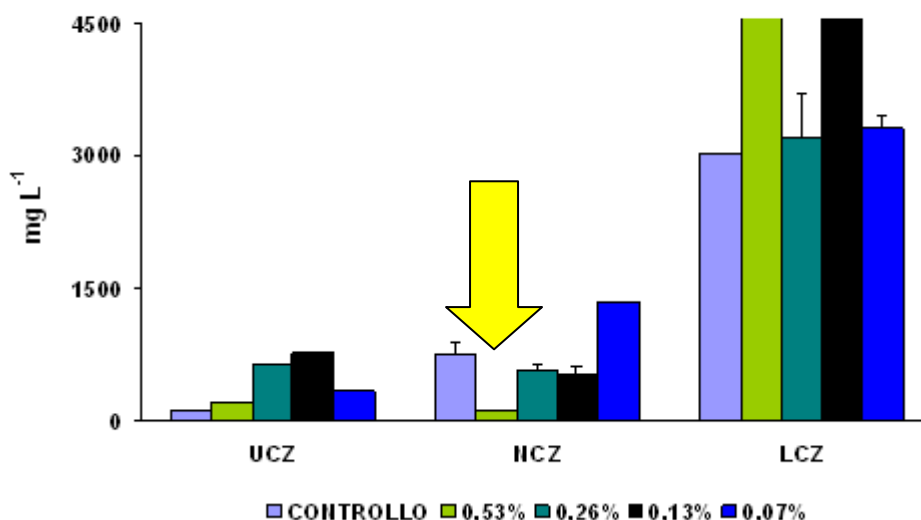
Fonte: foto G.M. Luna tramite microscopio

3.3.2. Trattamenti

I risultati relativi alla fase di sperimentazione sui campioni prelevati in inverno ed estate sono mostrati nelle Fig. 3.22 – 3.23 (dati riferiti alla TSM), Fig. 3.24 – 3.25 (dati riferiti alla concentrazione di clorofilla-a) e Fig. 3.26 – 3.27 (dati riferiti alla torbidità), rispettivamente.

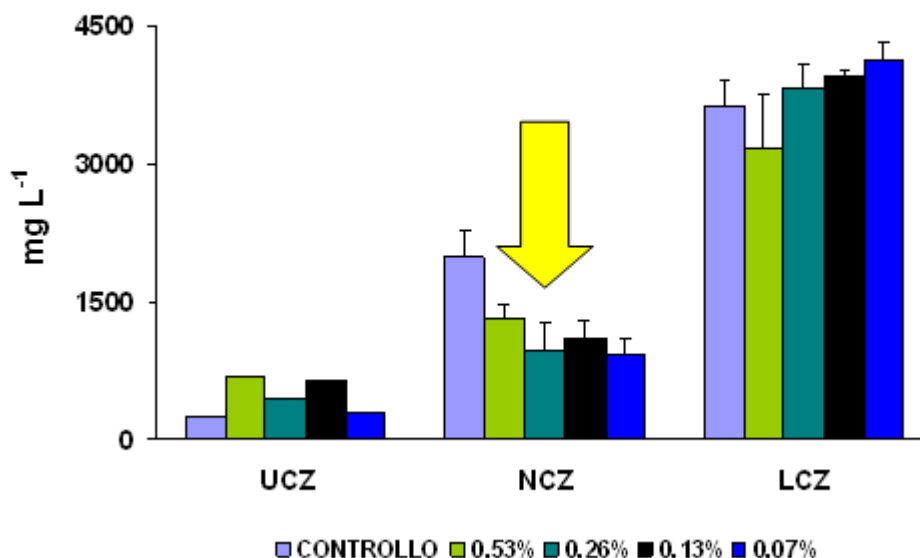
Nel campione invernale, in seguito all'iniezione del flocculante nello strato intermedio (NCZ), si osservava un marcato decremento della materia totale particellata (Fig. 3.22). La concentrazione di TSM diminuiva da $749 \pm 137 \text{ mg L}^{-1}$ (controllo) fino ad un valore minimo di $107 \pm 16 \text{ mg L}^{-1}$ (osservato con l'aggiunta di PAC alla concentrazione dell'0,53%). Tra tutti i trattamenti effettuati, si osservavano differenze statisticamente significative rispetto al controllo solamente nel trattamento 0,53% (ANOVA, $p < 0,01$). Analogamente, nel campione estivo, si osservava un decremento della TSM in seguito all'aggiunta di flocculante (Fig. 3.23). Le concentrazioni di TSM diminuivano da $1980 \pm 294 \text{ mg L}^{-1}$ (controllo) fino ad un valore minimo di $784 \pm 181 \text{ mg L}^{-1}$ (osservato con l'aggiunta di PAC alla concentrazione di 0,07%). In tutti e quattro i trattamenti effettuati (0,53%, 0,26%, 0,13% e 0,07%), le concentrazioni di TSM nello strato NCZ erano significativamente inferiori rispetto al controllo (ANOVA, $p < 0,01$).

Fig. 3.22 - Concentrazione di TSM nei microcosmi sperimentali allestiti con il campione invernale. UCZ: Upper Convective Zone. NCZ: Non Convective Zone. LCZ: Lower Convective Zone



Fonte: elaborazione dei dati di campionamento

Fig. 3.23 - Concentrazione di TSM nei microcosmi sperimentali allestiti con il campione estivo. UCZ: Upper Convective Zone. NCZ: Non Convective Zone. LCZ: Lower Convective Zone.



Fonte: elaborazione dei dati di campionamento

I dati relativi alla concentrazione di clorofilla-a (Fig. 3.24 – 3.25), utilizzata come indicatore della biomassa autotrofa, mostravano un andamento analogo a quello osservato per la materia totale particellata (TSM). Si osservava, sia nel campione invernale che in quello estivo, una marcata diminuzione della concentrazione di clorofilla-a nello strato NCZ in seguito all'aggiunta di flocculante. In inverno, la concentrazione di clorofilla-a nello strato NCZ diminuiva da un valore di $0,25 \pm 0,0 \mu\text{g L}^{-1}$ (controllo) fino ad un minimo di $0,11 \pm 0,01 \mu\text{g L}^{-1}$ (osservato con l'aggiunta di PAC sia alla concentrazione di 0,13% che di 0,07%). Tutti i trattamenti effettuati comportavano una diminuzione significativa della concentrazione di clorofilla-a, nello strato NCZ, rispetto al controllo (ANOVA, $p < 0,01$). Nel campione estivo, la diminuzione nella concentrazione di clorofilla-a era più marcata, passando da un valore di $16 \pm 11 \mu\text{g L}^{-1}$ (controllo) ad un minimo di $3 \pm 2 \mu\text{g L}^{-1}$ (osservato con l'aggiunta di PAC sia alla concentrazione di 0,26%). Nel campione estivo, differenze significative tra trattamento e controllo si riscontravano esclusivamente nei trattamenti 0,26%, 0,13% e 0,07% (ANOVA, $p < 0,01$).

Fig. 3.24 - Concentrazione di clorofilla-a nei microcosmi sperimentali allestiti con il campione invernale. UCZ: Upper Convective Zone. NCZ: Non Convective Zone. LCZ: Lower Convective Zone

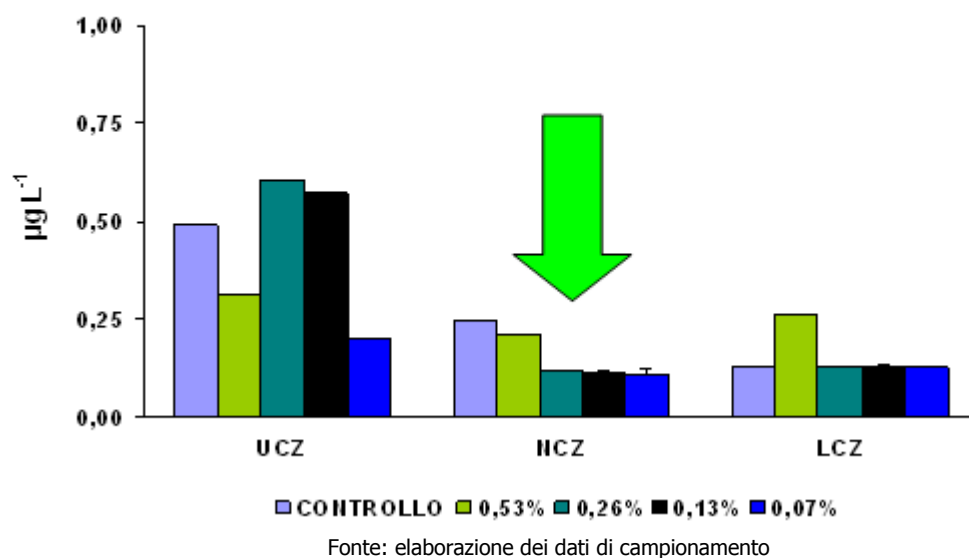
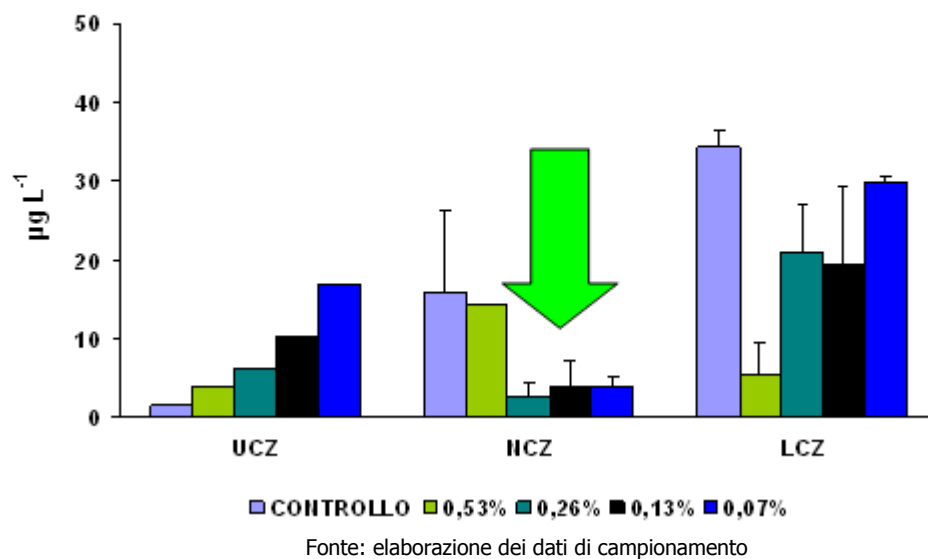


Fig. 3.25 - Concentrazione di clorofilla-a nei microcosmi sperimentali allestiti con il campione estivo. UCZ: Upper Convective Zone. NCZ: Non Convective Zone. LCZ: Lower Convective Zone



Anche la torbidità (Fig. 3.26 – 3.30) mostrava una chiara diminuzione nello strato NCZ in seguito all'aggiunta di flocculante (Fig. 3.27 – 3.28). In inverno, tale parametro si riduceva, nello strato NCZ, da 0,103 U.A. (controllo) fino ad un minimo di 0,004 U.A. (osservato con l'aggiunta di PAC alla concentrazione di 0,13%). Nel campione estivo, il valore di torbidità nel sistema di controllo era pari a 0,0642 U.A. Tale parametro raggiungeva il minimo in seguito all'aggiunta di 0,26% di PAC (i.e. 0,0134 U.A.), con una riduzione pari a ca. 5 volte. Sia in inverno che in estate, differenze significative tra trattamento e controllo si riscontravano esclusivamente nei trattamenti 0,26% e 0,13% (ANOVA, $p < 0,01$).

Fig. 3.26 - Azione del flocculante sul microcosmo estivo. Segnate in rosso si notano le particelle in fase di aggregazione



Fonte: foto B. Torres

Fig. 3.27 - Riduzione della torbidità nello strato NCZ in seguito al trattamento sperimentale 0,13% nel campione invernale



Fonte: foto B. Torres

Fig. 3.28 - Riduzione della torbidità nello strato NCZ in seguito al trattamento sperimentale 0,26% nel campione estivo



Fonte: foto B. Torres

Fig. 3.29 - Valori di torbidità (espressi come Unità di Assorbanza) nei microcosmi sperimentali allestiti con il campione invernale. UCZ: Upper Convective Zone. NCZ: Non Convective Zone. LCZ: Lower Convective Zone

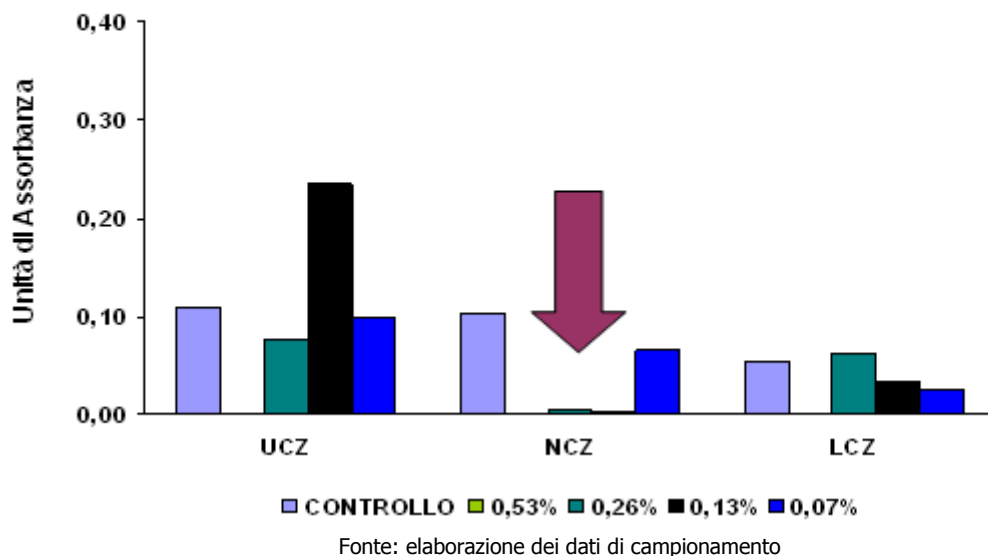
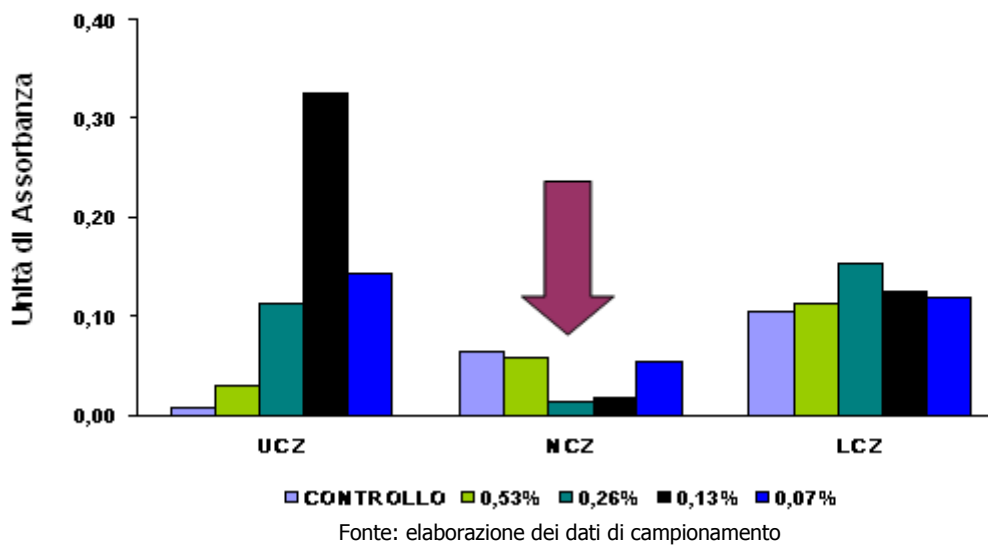


Fig. 3.30 - Valori di torbidità (espressi come Unità di Assorbanza) nei microcosmi sperimentali allestiti con il campione estivo. UCZ: Upper Convective Zone. NCZ: Non Convective Zone. LCZ: Lower Convective Zone



Le abbondanze procariotiche totali (Fig. 3.31 – 3.32) e le abbondanze virali totali (Fig. 3.33 – 3.34) mostravano una chiara risposta all’aggiunta del flocculante nei microcosmi sperimentali. Nel sistema sperimentale allestito con il campione invernale, l’abbondanza procariotica totale diminuiva, nello strato NCZ, da un valore iniziale di $1,71 \pm 0,17 \times 10^9$ cell L⁻¹ (controllo) fino ad un minimo di $0,73 \pm 0,16 \times 10^9$ cell L⁻¹ (osservato con l’aggiunta di PAC alla concentrazione di 0,13%). In questo caso, differenze significative nell’abbondanza procariotica tra trattamento e controllo si riscontravano esclusivamente nei trattamenti 0,26%, 0,13% e 0,07% (ANOVA, p<0,01). Nel sistema allestito con il campione estivo, l’abbondanza procariotica totale diminuiva da $4,77 \pm 0,17 \times 10^9$ cell L⁻¹ (controllo) ad un minimo di $2,81 \pm 0,52 \times 10^9$ cell L⁻¹ (osservato con l’aggiunta di PAC alla concentrazione di 0,07%). In questo caso, tutti i valori di abbondanza procariotica osservati nei sistemi di trattamento erano statisticamente inferiori rispetto ai valori osservati nel sistema di controllo (ANOVA, p<0,01).

Fig. 3.31 - Abbondanza procariotica totale nei microcosmi sperimentali allestiti con il campione invernale. UCZ: Upper Convective Zone. NCZ: Non Convective Zone. LCZ: Lower Convective Zone

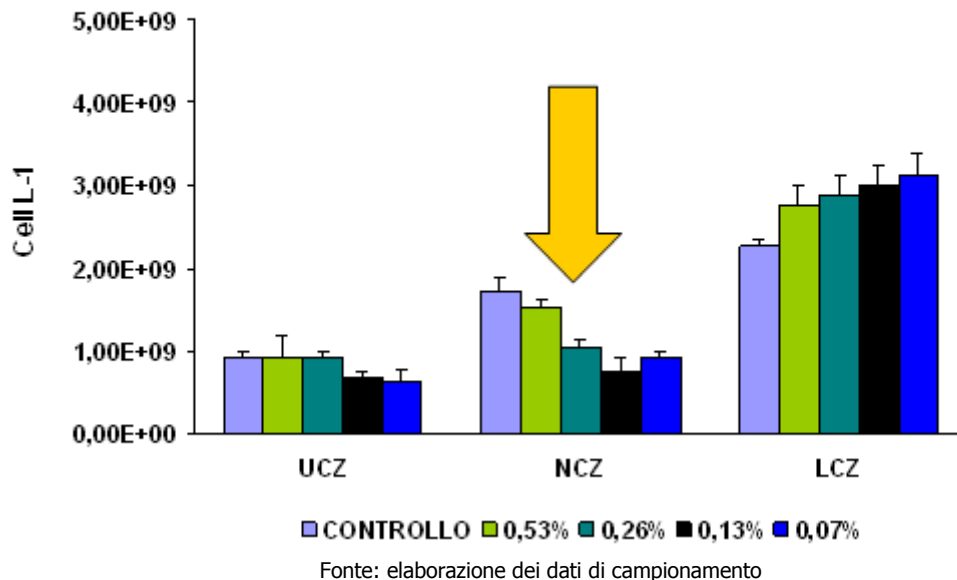
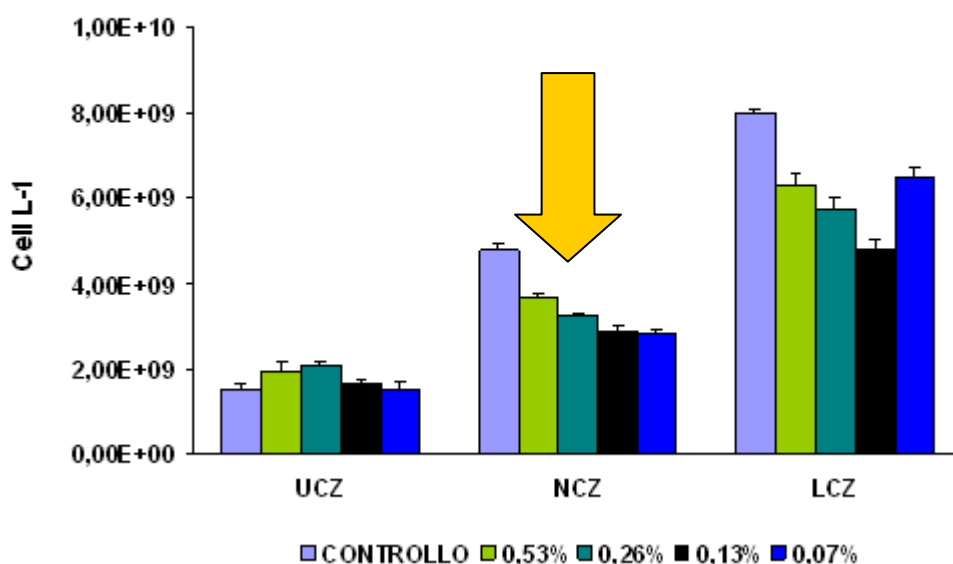


Fig. 3.32 - Abbondanza procariotica totale nei microcosmi sperimentali allestiti con il campione estivo.
UCZ: Upper Convective Zone. NCZ: Non Convective Zone. LCZ: Lower Convective Zone



Fonte: elaborazione dei dati di campionamento

Analogamente all'abbondanza procariotica totale, l'abbondanza virale totale mostrava un decremento in seguito all'aggiunta di flocculante (Fig. 3.33 – 3.34). In inverno, il decremento andava da un valore iniziale di $9.41 \pm 0,34 \times 10^9$ VLP L⁻¹ (nel sistema di controllo) ad un minimo di $5.87 \pm 0,17 \times 10^9$ VLP L⁻¹ (osservato con l'aggiunta di PAC alla concentrazione di 0,13%). Le abbondanze virali osservate nei sistemi addizionati con PAC allo 0,26% e 0,13% erano statisticamente inferiori a quelle osservate nel controllo (ANOVA, $p < 0,01$). In estate, l'abbondanza virale totale diminuiva da $9.41 \pm 0,34 \times 10^9$ VLP L⁻¹ (nel sistema di controllo) ad un minimo di $5.38 \pm 0,17 \times 10^9$ VLP L⁻¹ (osservato con l'aggiunta di PAC alla concentrazione di 0,13%). In questo caso, si riscontravano differenze significative in tutti i sistemi trattati rispetto al controllo (ANOVA, $p < 0,01$).

Fig. 3.33 - Abbondanza virale totale nei microcosmi sperimentali allestiti con il campione invernale. UCZ: Upper Convective Zone. NCZ: Non Convective Zone. LCZ: Lower Convective Zone

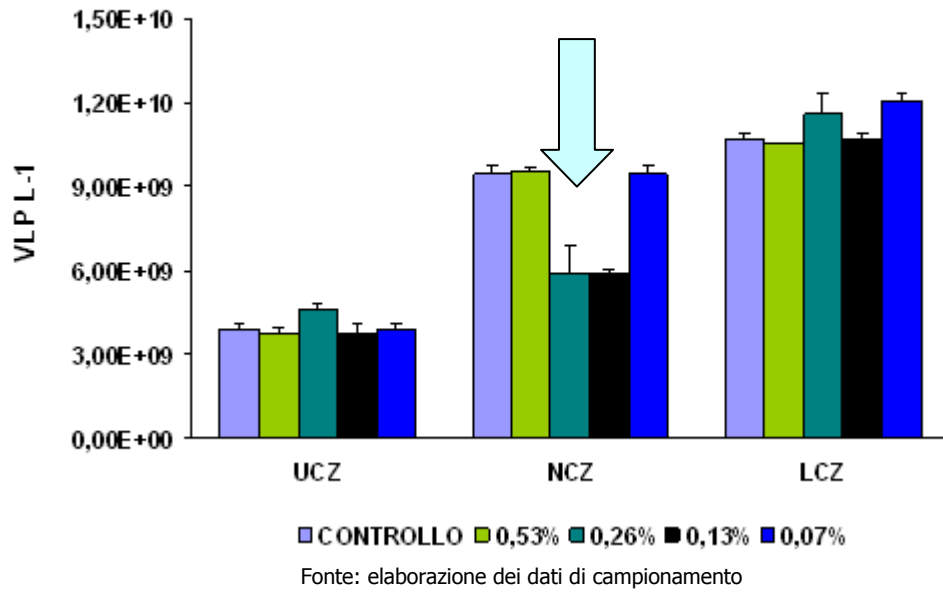
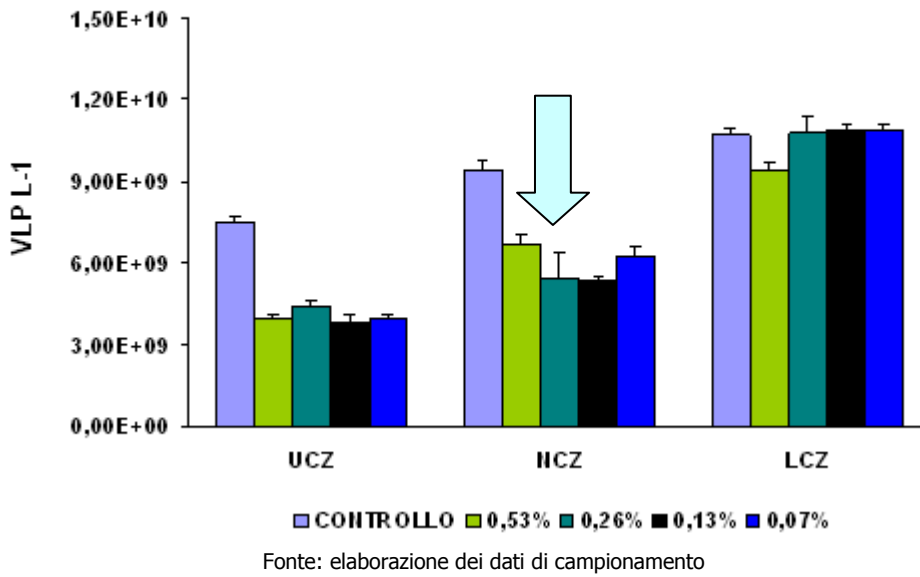


Fig. 3.34 - Abbondanza virale totale nei microcosmi sperimentali allestiti con il campione estivo. UCZ: Upper Convective Zone. NCZ: Non Convective Zone. LCZ: Lower Convective Zone



3.4. Discussione

Gli esperimenti di microcosmo condotti in questo studio dimostrano che l'iniezione nello strato intermedio del solar pond (i.e. nello strato NCZ) di flocculante PAC (Al_3O_2) in soluzione rappresenta un'efficace strategia per migliorare la trasparenza dell'acqua. Infatti, l'aggiunta di PAC ha comportato un notevole abbattimento sia del carico di materia sospesa (TSM) che della torbidità. Le percentuali di abbattimento di tali parametri sono riassunte in Tab. 3.1.

Tab. 3.1 - Riduzione (calcolata in percentuale) della concentrazione di materia totale particellata (TSM) e della torbidità nei microcosmi sperimentali. n.a. : dato non disponibile

Concentrazione Al_2O_3 (%)	Situazione "invernale"		Situazione "estiva"	
	% riduzione TSM	% riduzione torbidità	% riduzione TSM	% riduzione torbidità
0,53	86	n.a.	34	11
0,26	23	95	51	79
0,13	30	96	45	71
0,07	0	37	54	14

Fonte: elaborazione dei dati di campionamento

I trattamenti di aggiunta di flocculante hanno mostrato importanti differenze tra la situazione invernale (i.e. in assenza di *bloom* microalgale) e quella estiva (i.e. in presenza di un *bloom* di cianobatteri). Nel campione invernale, riferendosi al dato di materia totale particellata (TSM), l'aggiunta di PAC alla concentrazione dello 0.53% si è rivelata essere il migliore trattamento in termini di riduzione percentuale della concentrazione di TSM, portando ad una riduzione pari all'86% di tale parametro. Al contrario, in estate, concentrazioni minori di PAC (i.e. 0,26%, 0,13% e 0,07%) mostravano un'efficienza confrontabile (nel *range* 45-51%) nella riduzione della concentrazione di TSM. In base a tali risultati, è possibile concludere che nel pond esaminato, a concentrazioni di TSM nel *range* 500 – 750 mg/L (situazione invernale), la concentrazione ottimale di PAC corrisponde allo 0,53%. Al contrario, in condizioni di *bloom* cianobatterico e di maggiori concentrazioni di TSM (1500 – 2000 mg/L), le concentrazioni ottimali di PAC sono quelle nell'intervallo 0,26% - 0,07%. A tale riguardo, la letteratura scientifica disponibile indica i composti dell'alluminio (quali solfato di alluminio, cloruro di alluminio e policloruro di alluminio) e del ferro (ad esempio solfato ferrico, solfato ferroso e cloruro di ferro) come quelli maggiormente utilizzati per migliorare la trasparenza nei solar

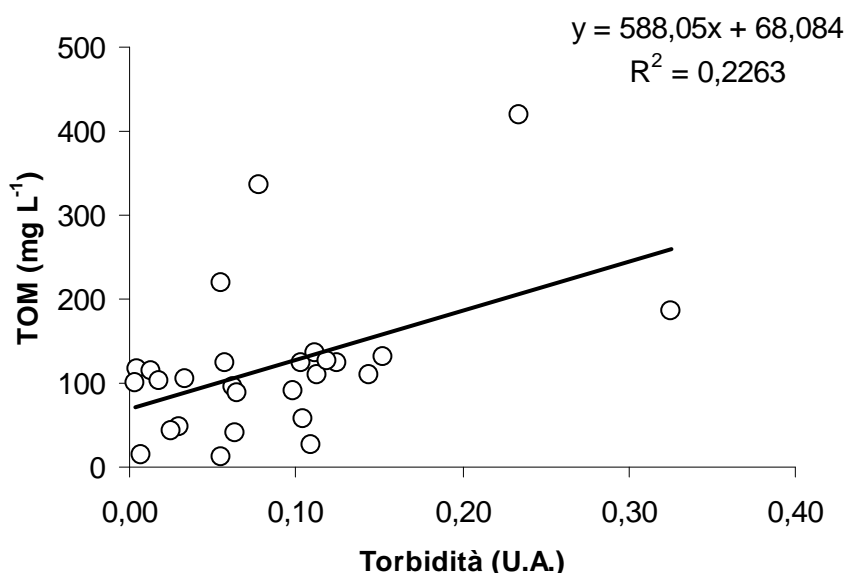
pond. Altri studi, condotti nel solar pond di El Paso (USA), riportano invece l'utilizzo del polimero 8157 (Nalco Chemicals, Inc.) come flocculante, senza tuttavia fornire informazioni dettagliate sulla concentrazione utilizzata. Le informazioni riportate in indicano che, in solar pond aventi concentrazione di TSM intorno ai 1500 mg/L, le concentrazioni di composti flocculanti ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \times 14\text{H}_2\text{O}$) ottimali sono del 2%. Al contrario, in un altro studio condotto nel solar pond di Margherita di Savoia, le concentrazioni ottimali riportate sono di gran lunga inferiori (20 ppm), ma per ottenere la trasparenza del pond era necessario eseguire il trattamento giornalmente per dieci giorni consecutivi ed in aggiunta alla presenza di un altro composto poli-elettrolita anionico (Prodefloc, PRODECO). A fronte di queste informazioni, questo studio dimostra che è possibile ottenere risultati migliori, in termini di abbattimento della TSM, con concentrazioni di PAC decisamente ridotte rispetto a quelle riportate nello studio condotto da Hull (1989). Inoltre, l'enorme variabilità nelle concentrazioni ottimali riportate nella letteratura suggeriscono che non è possibile determinare a priori le concentrazioni ottimali per la chiarificazione di un solar pond, ma che queste debbono essere attentamente identificate, per ogni pond in esame, in seguito a trattamenti su microscala analoghi a quelli effettuati in questo studio.

Riferendosi al parametro della torbidità, si osservava invece un andamento differente rispetto a quanto osservato con la TSM. Infatti, sia in estate che in inverno, si osservava una maggiore riduzione della torbidità con concentrazioni di PAC pari a 0.26% e 0.13%. La riduzione della torbidità era maggiore (95-96%) nel campione invernale, caratterizzato da una minore concentrazione di TSM (comprese tra 500 – 750 mg L⁻¹) e minore in quello estivo (79-71%), che invece era caratterizzato da concentrazioni di TSM (ca. 1500 – 2000 mg L⁻¹) e di procarioti totali (abbondanza nel *range* 10,8 – 4,77 x 10⁹ cell L⁻¹) maggiori. Questa differente risposta, osservata prendendo in considerazione i parametri della TSM e della torbidità, trova conferma statistica nell'assenza di significative correlazioni tra le misure di TSM e quelle di torbidità (n=27, n.s.). Ciò concorda con studi precedenti, i quali riportano come non sia possibile stabilire una correlazione diretta tra queste due variabili. Ciò deriva dal fatto che le proprietà ottiche di una sospensione sono influenzate, oltre che dalla quantità, anche dalla forma, dalle dimensioni e dall'indice di rifrazione delle particelle sospese, nonché dalla lunghezza d'onda del raggio incidente. Dato che la torbidità rappresenta il fattore chiave per l'efficienza dei solar pond e quello maggiormente responsabile per la diminuzione nella produzione di energia (vedi Capitolo 2), è possibile concludere, sulla base di tutti gli esperimenti condotti nel presente studio, che la concentrazione ottimale di PAC da utilizzare nel pond di Ancona è nel *range* 0,26%- 0,13%, sia in inverno che in estate. E' importante

ricordare che tali dati, ottenuti da esperimenti su microscala, devono essere validati su scala più ampia attraverso sperimentazioni di *scale-up*. In aggiunta, i risultati di questo studio suggeriscono che future pratiche di gestione e di miglioramento della trasparenza dovranno essere orientate a valutare l'effetto di flocculanti sul parametro della torbidità, piuttosto che, come sovente effettuato in passato, sulla sola misura della concentrazione di TSM.

Le misure di torbidità erano positivamente e significativamente correlate con le concentrazioni di materia organica particellata ($n=27$, $p<0,05$; Fig. 3.35), il che suggerisce un possibile ruolo giocato dalla componente organica particellata nella regolazione della torbidità all'interno del solar pond investigato.

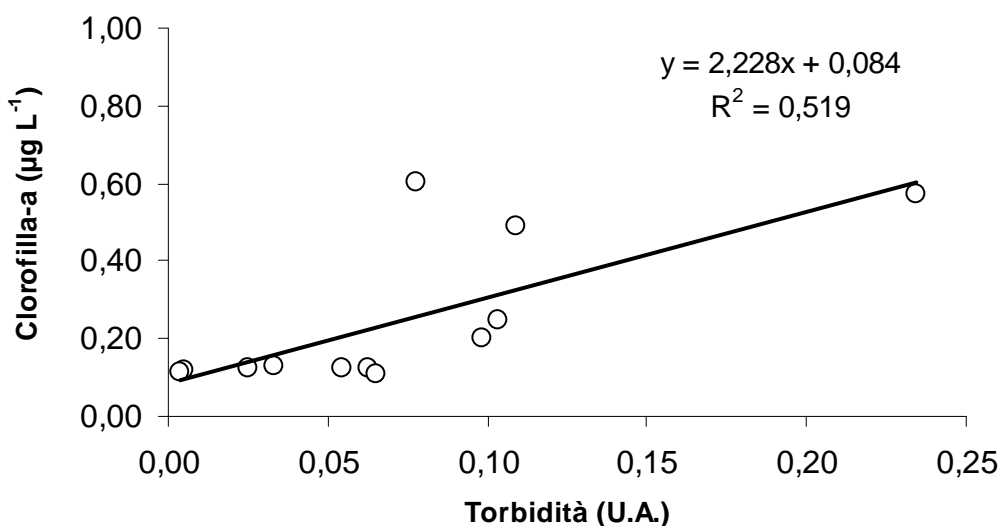
Fig. 3.35 - Relazione tra la torbidità e la materia organica particellata (TOM) osservata nei microcosmi sperimentali.



Fonte: elaborazione dei dati di campionamento

Inoltre, negli esperimenti condotti nel campione invernale, si riscontrava una relazione significativa tra la torbidità e la concentrazione di clorofilla-a ($n=12$, $p<0,05$; Fig. 3.36), a testimonianza di un importante ruolo giocato dalla componente autotrofa particellata (composta da microalghe e procarioti) nella regolazione della torbidità.

Fig. 3.36 - Relazione tra la torbidità e la concentrazione di clorofilla-a osservata nei microcosmi sperimentali allestiti con il campione invernale.



Fonte: elaborazione dei dati di campionamento

Tuttavia, la percentuale di varianza spiegata da queste variabili era, in entrambi i casi, relativamente bassa (nel *range* 22-52%), il che lascia supporre che altre variabili intervengano nella regolazione della torbidità all'interno del solar pond. I valori di torbidità e le altre variabili biologiche investigate (abbondanza totale di procarioti ed abbondanza totale virale) non mostravano relazioni significative (per entrambi $n=27$, n.s.). Complessivamente, questi risultati, seppure ancora preliminari, suggeriscono di investigare in futuro le possibili relazioni tra la torbidità ed altri parametri biologici non presi in considerazione in questo studio (ad esempio la concentrazione di materia organica disciolta) al fine di meglio comprendere quali variabili sono responsabili della diminuzione della trasparenza nei solar pond.

In conclusione, questi dati dimostrano, per la prima volta, che i sistemi solar pond artificiali ospitano delle comunità microbiche abbondanti e diversificate. Tale componente biotica è costituita principalmente da Procarioti (Batteri ed Archaea), fitoplancton e zooplancton (*Artemia salina*) ed ha mostrato, nel corso di questo studio, delle notevoli fluttuazioni stagionali, in possibile conseguenza delle mutate condizioni ambientali di tali sistemi. Queste fluttuazioni possono giocare un ruolo importante nella regolazione della trasparenza ed, in ultima analisi, dell'efficienza energetica di tali sistemi. Ciò rende evidente la necessità di effettuare studi futuri volti a monitorare la

componente biologica, insieme ai parametri energetici e chimico-fisici, anche a fini energetici (ad esempio per il miglioramento del regime termico).

La capacità di tali sistemi di permettere la crescita di questi microrganismi si pone anche, in prospettiva futura, come un possibile sviluppo dei solar pond. Ad esempio, tali sistemi possono essere orientati, oltre alla produzione di energia, anche alla crescita di microrganismi (microalghe, batteri, etc.) aventi interesse commerciale o biotecnologico (vedi Capitolo 5 della presente tesi). Lo sviluppo di tali sistemi integrati apre delle nuove prospettive circa il futuro dei solar pond come produttori di energia ed, allo stesso tempo, di risorse rinnovabili.

4 MANTENIMENTO DEL GRADIENTE SALINO

4.1. Il problema del gradiente salino

L'esistenza della zona intermedia (NCZ) è essenziale per la funzionalità stessa del solar pond. Nel tempo, però, se non viene condotta un'adeguata manutenzione, il gradiente salino e quello termico tendono ad omogeneizzarsi. Questo fenomeno detto *doppio diffusivo*, comporta la redistribuzione del sale nella massa del pond e la dispersione del calore. La conseguenza che ne deriva è il lento mescolamento delle tre zone che porta alla distruzione dell'intero sistema. In particolare si ha che la zona superficiale tende ad ispessirsi ed omogeneizzarsi con la zona gradiente che di conseguenza si riduce in spessore e concentrazione, mentre la zona inferiore tende a disperdere calore verso la zona sovrastante.

Fig. 4.1 - Fase di riempimento con il sale del solar pond sperimentale di Ancona



Fonte: foto P. Principi

Per far fronte a tutto ciò, si procede con iniezioni localizzate di soluzione salina concentrata tramite un diffusore con un salto molto sottile.

Un altro problema che può verificarsi in un sistema solar pond in funzione, è la formazione di anomalie nella zona a gradiente. La presenza di corpi estranei, quali insetti o detriti, che si posizionano a diversa altezza lungo la colonna d'acqua in base alla loro densità, possono causare la rifrazione o l'assorbimento della radiazione solare tale da modificare il gradiente stesso. In particolare si assiste alla formazione di un *ginocchio* nel profilo termico e salino, che va corretto con un'iniezione mirata di soluzione salina concentrata.

La gestione del sale non è richiesta nelle situazioni in cui si ha sale a basso costo, piogge sufficienti per il "lavaggio" della zona superficiale e il sale di scarto del lavaggio può essere semplicemente scaricato in un fiume. In casi in cui le piogge sono ottimali ma il sale va smaltito, si devono adottare le stesse procedure di smaltimento usate per il sale sparso sulle strade per la rimozione di neve o ghiaccio nella stagione invernale.

Un piano adeguato di gestione va invece studiato nelle situazioni in cui i tassi di evaporazione superano quelli delle precipitazioni, per cui è opportuno, se non obbligatorio, provvedere con il riciclo del sale. In questi casi si usano dei pond ausiliari detti di evaporazione, tarati in base alla massima salinità sopportata nella zona superficiale e ai tassi di evaporazione e precipitazione locali. Con lo scopo di ammortizzare i costi, si può utilizzare il sale riciclato per le iniezioni nelle zone NCZ e LCZ per il mantenimento del profilo salino, creando solar pond a ciclo chiuso.

4.2. Metodi di misura della salinità

4.2.1. Primo metodo

Un possibile metodo per la misura della salinità in sistemi solar pond reali è rappresentato dalla raccolta di campioni d'acqua a diversa profondità e alla successiva misura con il metodo gravimetrico o con rifrattometro. Per la raccolta dei campioni si usa un sistema di 31 tubicini di PVC, del diametro interno di 6 mm, fissati ad un tubo di PEAD (polietilene ad alta densità), lungo 4 m, con diametro interno di 10 cm. I tubicini sbucano dal tubo a intervalli di 10 cm (Fig. 4.2).

Fig. 4.2 - Particolare dello strumento di campionamento dell'acqua in cui si vedono i tubicini che sbucano alle diverse profondità



Fonte: foto G. Pavanello

Una volta assicurato il tubo al pontile del Pond, in posizione verticale, è sufficiente collegare una pompa a vuoto all'estremità superiore di ogni tubicino per raccogliere i campioni d'acqua alle diverse profondità. Questo metodo permette anche di misurare contemporaneamente alla salinità, la Temperatura grazie a 31 termocoppie, montate in abbinamento ad ogni tubicino, più una esterna per misurare la temperatura ambientale.

Per la stima della salinità si può usare il metodo gravimetrico, facendo evaporare in stufa 0,5 ml d'acqua per ogni campione all'interno di eppendorf, che sono pesate prima dell'inserimento del campione, dopo l'inserimento, e dopo l'evaporazione. Dalla differenza di peso si ricava la differenza di densità e quindi la salinità.

La misura tramite rifrattometro si basa sul prelievo di una goccia di soluzione del solar pond da immettere sulla superficie colorata dello strumento (Fig. 4.3) e sulla lettura del valore.

Fig. 4.3 - Rifrattometro manuale usato per la misura della salinità



Fonte: <http://www.aquariumline.com/catalog/.html>

4.2.2. Secondo metodo

Per la gestione del gradiente salino su cui si basa il solar pond è molto importante conoscere in tempo reale i profili di salinità e temperatura, i quali permettono di individuare l'eventuale presenza di anomalie nel sistema. A questo scopo un metodo per misurare la salinità in sistemi solar pond in funzione è la misura effettuata in continuo tramite sonde (Fig. 4.4). Questi strumenti si basano sulla misura della conducibilità elettrica in funzione del sale presente e della temperatura. I dati di output sono diretti ad un computer che registra i valori in continuo fornendo in tempo reale il profilo di salinità e temperatura del pond. Questo metodo è forse il più indicato per solar pond in funzione, perché permette un monitoraggio continuo e rapido dei due profili caratterizzanti il sistema.

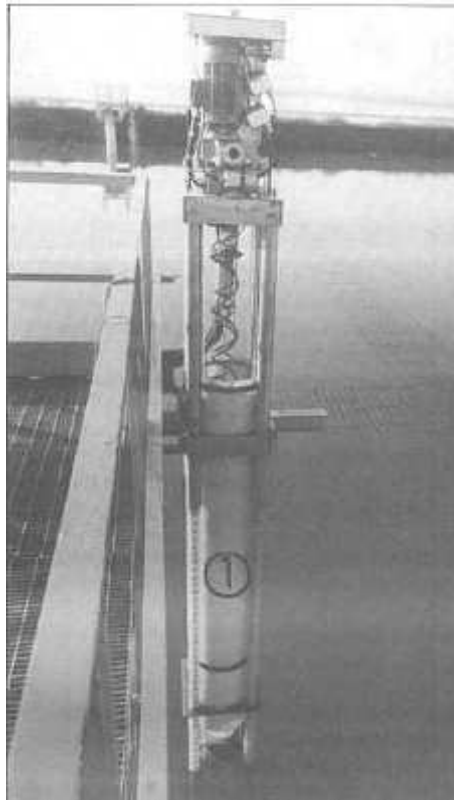
Fig. 4.4 - Particolare di una sonda utilizzata per la misura di salinità e temperatura. In rosso è indicato il sensore della conducibilità elettrica (salinità), mentre in verde quello della temperatura



Fonte: foto G. Pavanello

Un esempio di applicazione del secondo metodo è dato dal solar pond di Margherita di Savoia (Fig. 4.5). La struttura dello strumento è stata progettata per rispondere ad alcuni requisiti, come che la misura di densità sia in tempo reale, la profondità sia indipendente dal cambiamento di T della soluzione e che densità e temperatura siano direttamente correlate. La sonda è dotata di una testa di titanio che si immerge nel fluido e scende in profondità con una velocità compresa nel range 2 – 12 cm/min. Nell'apparato sono inseriti i sensori per la Temperatura, per la densità e una pompa circolare [21].

Fig. 4.5 - Apparato installato presso il solar pond di Margherita di Savoia usato per la misura di densità e temperatura



Fonte: Folchitto (1991)

4.3. Correzione del gradiente

Le iniezioni localizzate rappresentano l'intervento migliore per mantenere o ripristinare il gradiente salino qualora sia necessario. È auspicabile che la soluzione salina immessa abbia caratteristiche il più possibile simili al livello di iniezione. Per questo, come già detto, è consigliato tarare il diffusore su uno

spessore molto piccolo, così da limitare il più possibile fenomeni di disturbo all'equilibrio del sistema.

La zona superficiale (UCZ), se lasciata a se stessa, anche con la completa esclusione dell'effetto del vento, ha la tendenza a crescere fino a diventare troppo spessa per garantire una buona performance del pond. Per evitare questo fenomeno bastano delle iniezioni di soluzione salina subito sotto il confine con la zona a gradiente, che possono essere periodiche o continue in base alla necessità.

Nella zona gradiente va invece evitata la formazione di moti convettivi, ma se la forza del gradiente è tale da resistere all'erosione delle zone superiore e inferiore, si può procedere con iniezioni che siano, però, esattamente della stessa concentrazione salina del livello interessato.

La zona inferiore va controllata contemporaneamente ai tassi di estrazione del calore. Si deve instaurare un gradiente di temperatura che sia circa zero vicino al confine superiore della zona, in modo che l'erosione dovuta alla convezione termica sia minima e la zona gradiente rimanga così al livello stabilito.

4.4. Sperimentazione sulla tecnica di ripristino

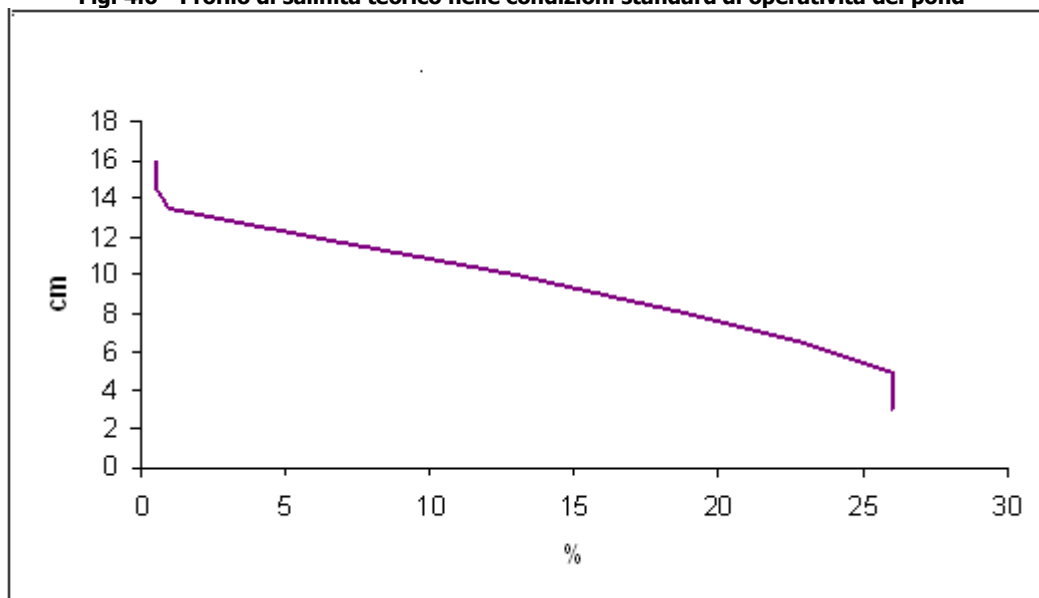
L'obiettivo della presente sperimentazione era testare l'efficacia di iniezioni mirate di soluzione salina a diversa concentrazione, al fine di ripristinare il gradiente salino in sistemi solar pond. In particolare è stata simulata la manutenzione di un impianto in funzione in modo da fornire delle linee guida per la manutenzione ordinaria del gradiente salino che, come già visto, col tempo tende a omogeneizzarsi (vedi Paragrafo 4.1.).

4.4.1. Materiali e metodi

Analogamente ai trattamenti di chiarificazione descritti nel Capitolo 2 della presente Tesi, il lavoro sperimentale si è basato su microcosmi artificiali, costituiti da *beaker* in vetro della capacità di 2000 cm³. In ogni microcosmo sono state mimate in scala le condizioni di un solar pond con il profilo salino alterato. Sono stati ricreati in laboratorio differenti microcosmi, rappresentativi di due situazioni tipo, e sono quindi stati utilizzati per effettuare le successive prove di iniezione della soluzione salina concentrata. Lo *scenario 1* rappresentava una situazione in cui si ha un calo generale della salinità dovuto a precipitazioni abbondanti, ad alti tassi di evaporazione o alla migrazione del sale sulla massa del pond. Lo *scenario 2* invece rappresentava una condizione

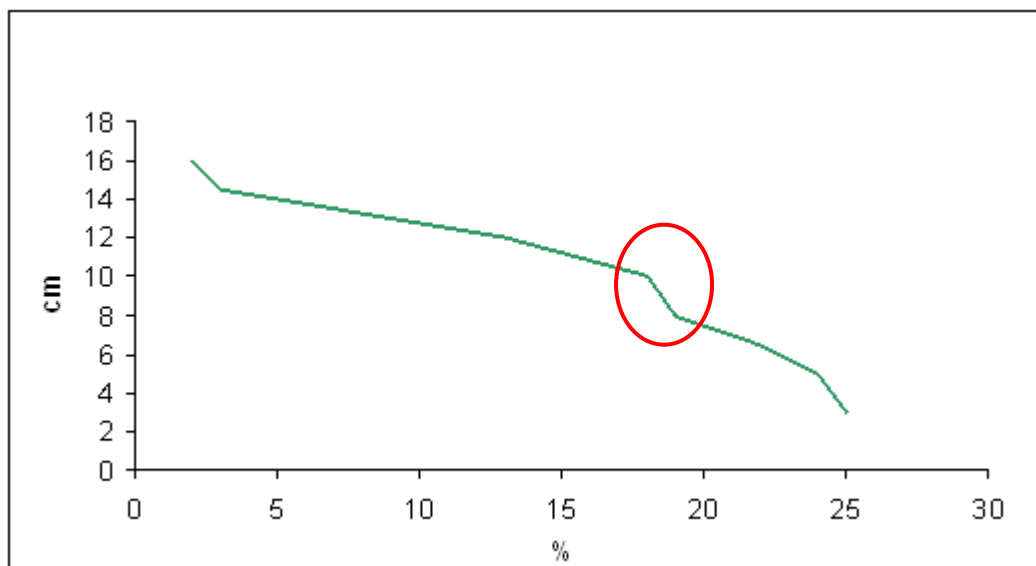
di anomalia della zona gradiente causata da corpi estranei o da altri effetti di rifrazione per i quali si va a creare un ginocchio nel profilo salino (Fig. 4.6).

Fig. 4.6 - Profilo di salinità teorico nelle condizioni standard di operatività del pond



Fonte: elaborazione dei dati di campionamento

Fig. 4.7 - Profilo di salinità teorico in presenza del ginocchio (indicato in rosso)



Fonte: elaborazione dei dati di campionamento

In entrambi i casi, per ricreare il gradiente alterato del pond, è stata calcolata la salinità da raggiungere nello strato di fondo (20% e 26% nella situazione 1 e 2 rispettivamente) e nello strato intermedio (10% medio nella situazione 1 e alterazione delle singole quote nella situazione 2), così da ricavare la quantità di sale (NaCl) necessaria. Utilizzando una piastra riscaldante a 80 °C vi è stato posizionato sopra il *beaker* contenente 1400 ml di acqua deionizzata e 280 g di NaCl nella situazione 1 e 364 g nella situazione 2, agitando fino al completo scioglimento del sale. Gli strati superiori sono stati creati successivamente addizionando ulteriore acqua deionizzata attraverso un diffusore mobile.

Allestito il microcosmo e stabilita la stratificazione, è stata misurata la salinità attraverso un rifrattometro (Fig. 4.3) a quote fisse di prelievo misurate come distanza dal fondo e illustrate nella tabella seguente.

Tab. 4.1 - Quote del microcosmo, espresse in cm, alle quali è stata misurata la salinità. LCZ: Lower Convective Zone. NCZ: Non Convective Zone. UCZ: Upper Convective Zone.

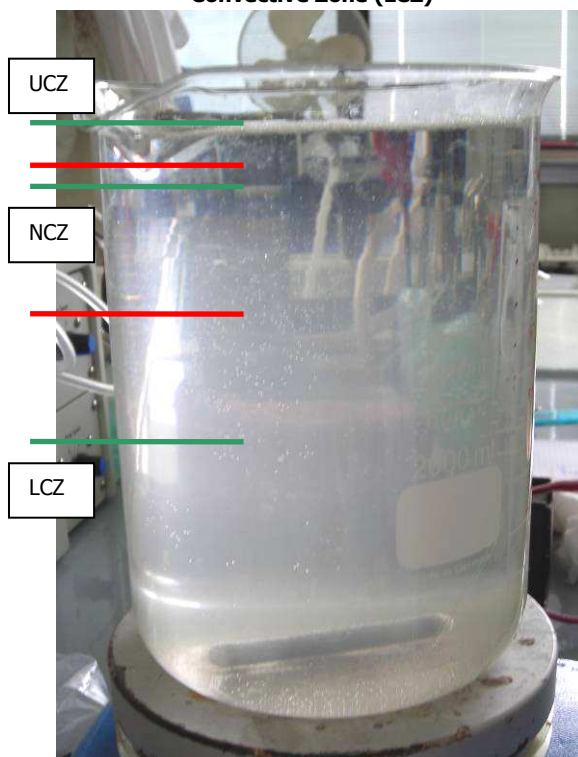
Quota dal fondo	
<i>cm</i>	
	3
LCZ	5
	6,5
	8
NCZ	10
	12
	13,5
UCZ	14,5
	16

Fonte: elaborazione dei dati di campionamento

4.4.2. Risultati

Per lo *scenario 1* il microcosmo riprodotto mostrava una errata divisione degli strati (Fig. 4.8) causata dalla salinità inferiore e dallo spostamento delle interfacce verso l'alto.

Fig. 4.8 - Gradiente salino formato per lo scenario 1. In rosso sono segnate le interfacce sfalsate dello scenario e in verde quelle da ottenere. Upper Convective Zone (UCZ), Non Convective Zone (NCZ) e Lower Convective Zone (LCZ)

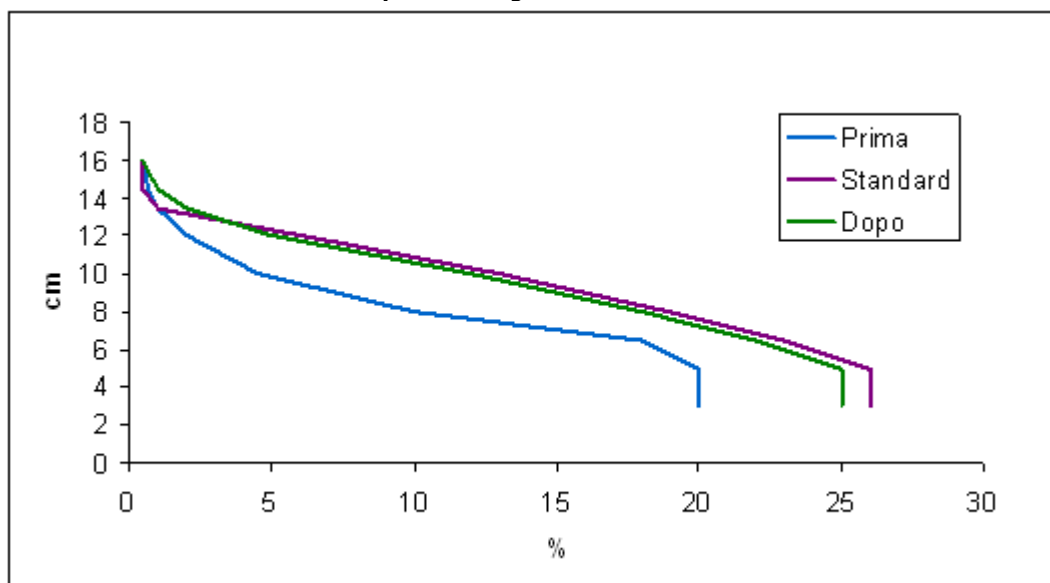


Fonte: foto B. Torres

Dalle misure di salinità effettuate e dallo studio del profilo salino presente nel microcosmo, sono state calcolate le concentrazioni da raggiungere alle diverse quote e la quantità di sale da aggiungere per ottenerle. L'intervento di ripristino è stato effettuato estraendo acqua secondo alle quote mostrate nella Tab. 4.1 e concentrando la soluzione fino ad ottenere la salinità desiderata.

Partendo dallo strato di fondo, l'acqua è stata estratta tramite pipetta, posta in un *beaker* da 500 ml, concentrata grazie all'aggiunta di sale (NaCl) e reinserta alla quota di prelievo tramite diffusore mobile (lo stesso utilizzato per la realizzazione del gradiente). Per facilitare lo scioglimento del sale, la soluzione è stata mescolata tramite agitatore. La salinità misurata prima e dopo le iniezioni di soluzione salina concentrata, ha mostrato un soddisfacente ripristino delle condizioni standard di operatività (Fig. 4.9).

Fig. 4.9 - Profilo di salinità relativo allo scenario 1 come si presentava prima e dopo il trattamento di ripristino del gradiente



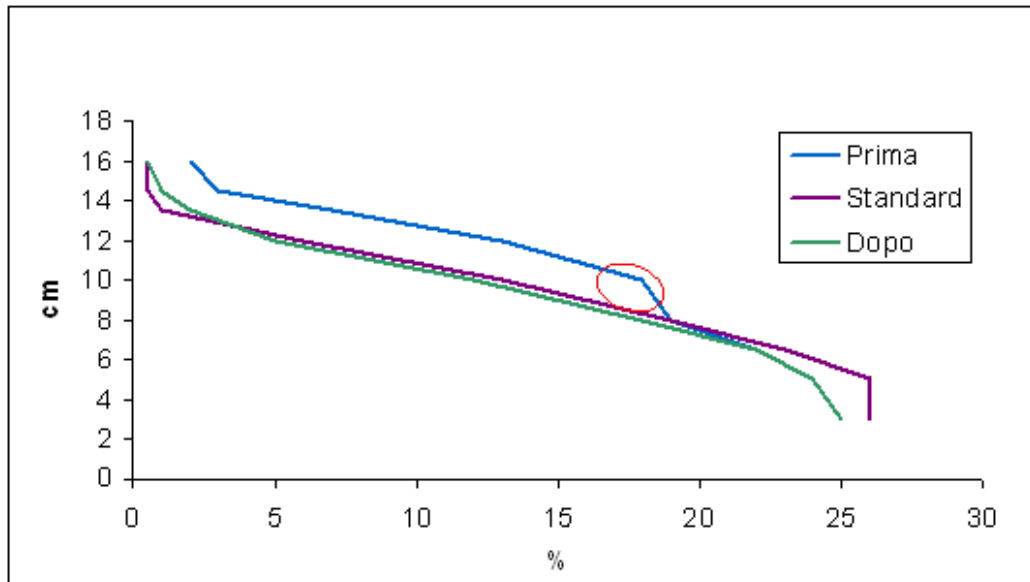
Fonte: elaborazione dei dati di campionamento

Per lo *scenario 2* il microcosmo riprodotto mostrava la presenza di un ginocchio non visibile, ma riscontrabile mediante le misure della salinità e la ricostruzione del profilo salino.

Il procedimento seguito è stato lo stesso di quello per lo scenario 1, con la differenza che in questo caso l'intervento richiedeva particolare attenzione. Data la eterogeneità del profilo salino è stato necessario analizzare la salinità quota per quota. Nei livelli in cui la salinità presente era inferiore a quella standard, l'azione è stata quella di estrarre, concentrare e reinserire la soluzione alla stessa quota di prelievo. Nei livelli in cui la salinità risultava essere maggiore di quella richiesta (zona del ginocchio) l'azione è stata quella di estrarre, diluire e reinserire la soluzione. Come per lo scenario 1, l'iniezione mirata è stata effettuata tramite diffusore mobile.

La salinità, misurata prima e dopo le iniezioni di soluzione salina concentrata, ha mostrato un soddisfacente ripristino delle condizioni standard di operatività (Fig. 4.10).

Fig. 4.10 - Profilo di salinità relativo allo scenario 2 come si presentava prima e dopo il trattamento di ripristino del gradiente. Indicata in rosso la presenza del 'ginocchio'



Fonte: elaborazione dei dati di campionamento

5 APPLICAZIONI PRATICHE

5.1. Interventi di politica energetica internazionale

Come è risaputo l'incremento demografico, combinato all'aumento dei consumi pro-capite, porterà ad una crescita senza precedenti della domanda mondiale di combustibili fossili. Anche se negli ultimi decenni il petrolio ha diminuito il suo peso percentuale nei consumi, continua a rimanere la risorsa principalmente sfruttata. Oltre a queste preoccupazioni, il rispetto dei criteri della sostenibilità economica e ambientale spinge verso la ricerca della massima efficienza energetica che, non solo diventerà un fattore discriminante nelle scelte tecnologiche, ma consentirà anche a parità di emissioni di ottenere il massimo accesso sociale ai benefici derivanti dall'uso dell'energia.

Termini come anidride carbonica, effetto serra e riscaldamento globale, così come le problematiche da essi evocate, sono ormai entrati a far parte del linguaggio comune e non solo. Anche a livello istituzionale vengono intraprese politiche sempre maggiori volte alla protezione dell'ambiente.

In particolar modo il Protocollo di Kyoto rappresenta l'accordo internazionale per la riduzione delle emissioni dei gas serra. Entrato in vigore soltanto nel 2005, dopo anni di ripensamenti e modifiche, si basa su un importante principio di applicazione. Il protocollo impone, infatti, una riduzione complessiva del 5,2%, ma diversificata in base al grado di sviluppo industriale e alle emissioni di ogni singolo Paese. Per la realizzazione di questo obiettivo sono nati dei meccanismi flessibili che hanno lo scopo di minimizzarne i costi.

Ad ogni Paese vengono attribuiti, infatti, dei diritti di emissione detti Assigned Amounts (AAs). Con questo acronimo si identifica la quantità di gas serra che ogni Paese compreso nell'Annex 1 del protocollo (vedi Appendice), è autorizzato ad emettere nel periodo 2008 – 2012.

5.1.1. International emission trading

Questo meccanismo prevede la possibilità di trasferimento dei propri diritti di emissione o di acquisto dei diritti di un altro Paese. Il sistema crea un vero e proprio mercato delle quote di emissione, favorendo la riduzione delle emissioni anche oltre gli obblighi imposti dal Protocollo. Infatti i Paesi che le riducono in misura maggiore rispetto al target loro imposto, possono vendere il surplus ad altri Paesi soggetti a vincolo.

In questo modo il Paese inquinante ha tre diverse possibilità d'azione. Si possono usare tutti gli AAs in possesso, abbattere le emissioni e vendere i permessi residui o abbattere le emissioni in maniera minore e comprare permessi da altri Paesi che ne hanno a disposizione.

Il risultato che ne deriva è la minimizzazione dei costi di abbattimento delle emissioni nocive, ridistribuendone il peso dalle parti i cui costi sono inizialmente maggiori a quelle che inizialmente li hanno minori, fino al raggiungimento della convergenza.

Il sistema europeo.

L'unione Europea con la direttiva 2003/87/CE ha definito e disciplinato un proprio sistema dell'Emission Trading, avviato poi nel 2005. Il sistema naturalmente si ispira all'International emission trading (IET) e si basa sull'assegnazione a ciascun partecipante di un tetto di emissioni annuali, definito *cap* e di corrispondenti quote di emissioni, espresse in tonnellate di CO₂. Se le emissioni annuali effettive risultano minori al cap, le quote di emissioni residue possono essere cedute ad altri partecipanti che, invece, ne difettano. Si crea così un mercato delle quote di emissione.

Anche se i due sistemi sono simili, ci sono delle importanti differenze tra il sistema europeo e quello istituito dal Protocollo di Kyoto. Cambiano i soggetti giuridici interessati al commercio, in quanto lo IET coinvolge Paesi inclusi nell'Annex1, mentre lo schema europeo crea un rapporto di scambio anche a livello inter-nazionale e intra-nazionale. Cambiano i requisiti di controllo e verifica, perché lo IET lascia più spazio all'interpretazione dei partecipanti, mentre quello europeo è più vincolante. Cambia inoltre il campo di applicazione dei gas serra, in quanto il sistema IET coinvolge tutti i gas responsabili dell'effetto serra, mentre il sistema europeo considera solo le emissioni di CO₂.

5.1.2. Joint implementation

Questo meccanismo stabilisce la possibilità di collaborazione fra i Paesi dell'Annex 1. Si possono, infatti, trasferire o acquisire *emission reduction units* (ERUs) realizzate attraverso specifici progetti implementati in altri Paesi facente parte dell'Annex 1. Gli ERUs rappresentano il credito equivalente ad una tonnellata di CO₂ generata da un progetto di joint implementation.

La messa in opera del meccanismo prevede che un Paese investitore realizzi un progetto in un Paese ospite. Le emissioni di gas serra del progetto devono essere inferiori alle emissioni che sarebbero altrimenti state generate da un progetto standard che il paese ospite avrebbe realizzato senza i fondi

dell'altro paese. In questo modo il paese investitore ottiene delle ERUs pari alle tonnellate di gas serra non emesse in atmosfera che verranno poi conteggiate per il raggiungimento del proprio target.

5.1.3. Clean development mechanism

Il meccanismo clean development è molto simile a sistema di joint implementation. Esso dà la possibilità a governi e privati di Paesi industrializzati di realizzare progetti di riduzione delle emissioni in Paesi in via di sviluppo ottenendo certificati detti CERs, certified emission reductions. I CERs, come per gli ERUs, rappresentano il credito equivalente ad una tonnellata di CO₂ generato da un progetto clean development. La differenza fondamentale che contraddistingue questo meccanismo flessibile da quello di joint implementation è che i progetti devono essere realizzati da Paesi facente parte dell'Annex 1 (si veda in Appendice) in paesi che non ne sono compresi. Il principale vantaggio dell'attuazione di questo meccanismo è che il paese ospite ne ricava una spinta allo sviluppo, mentre il finanziatore ottiene i certificati CERs utili a rispettare il vincolo previsto nel Protocollo. Altri vantaggi si riscontrano soprattutto in rapporto agli elevati costi che si dovrebbero altrimenti sostenere per migliorare l'efficienza energetica e ridurre le emissioni inquinanti nei paesi industrializzati. A parità di riduzione, infatti, è molto meno oneroso intervenire nei paesi in via di sviluppo dove spesso sono presenti impianti a bassa efficienza.

5.2. La situazione nazionale

Le emissioni di anidride carbonica dovute al settore energetico italiano provengono per il 35% del totale dai processi di trasformazione dell'energia. In seguito alla liberalizzazione del settore, una nuova forma di incentivazione delle fonti rinnovabili è costituita dai *certificati verdi*. Si tratta di certificati a garanzia di un quantitativo di energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili. Come per le quote di emissione di CO₂, anche i certificati verdi sono soggetti a libero scambio tra produttori e importatori, i quali hanno l'obbligo di immettere annualmente nel mercato una determinata quota di energia prodotta da fonti rinnovabili.

5.2.1. Quote di riduzione della CO₂

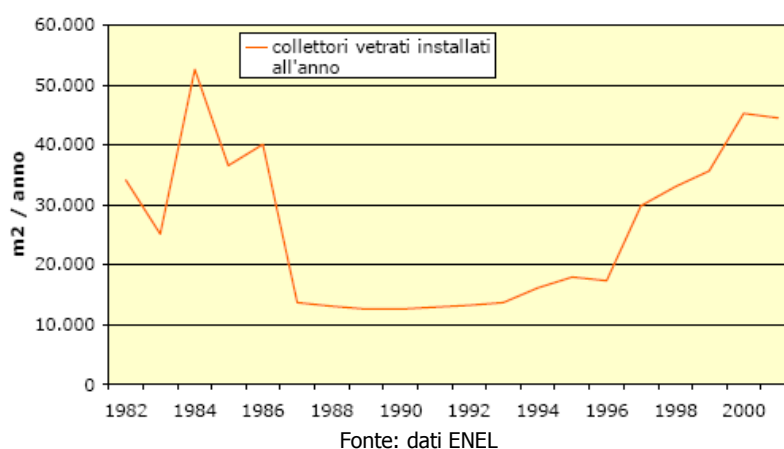
L'obiettivo italiano di riduzione delle emissioni di CO₂ è fissato al 6,5% rispetto ai livelli del 1990. Questo comporta che la quantità di emissioni

assegnate all'Italia non potrà superare 487,1 Mt di CO₂ nel periodo di riferimento 2008 – 2012. Senza considerare che nell'ultimo decennio le emissioni sono considerevolmente aumentate, nel nostro paese le politiche di attuazione di programmi e iniziative volte alla riduzione delle emissioni sono poche e deboli. È chiaro quindi che lo sforzo italiano per riuscire a rispettare l'obiettivo imposto dal Protocollo di Kyoto è notevole. Anche se sono già all'attivo progetti di Clean Development Mechanism (CDM) e Joint Implementation (JI) in Cina, nei Balcani e nei territori nord africani, dovranno essere adottate ulteriori misure riduttive. In questo contesto i meccanismi flessibili giocano un ruolo chiave, non solo al fine di ridurre il carico previsto del Protocollo, ma anche per rendere l'Italia più competitiva nel settore energetico. Tali meccanismi hanno il vantaggio inoltre di ridurre a costi ragionevoli le emissioni, limitando interventi sul territorio nazionale, che sarebbero sicuramente più costosi.

5.2.2. Radiazione solare disponibile

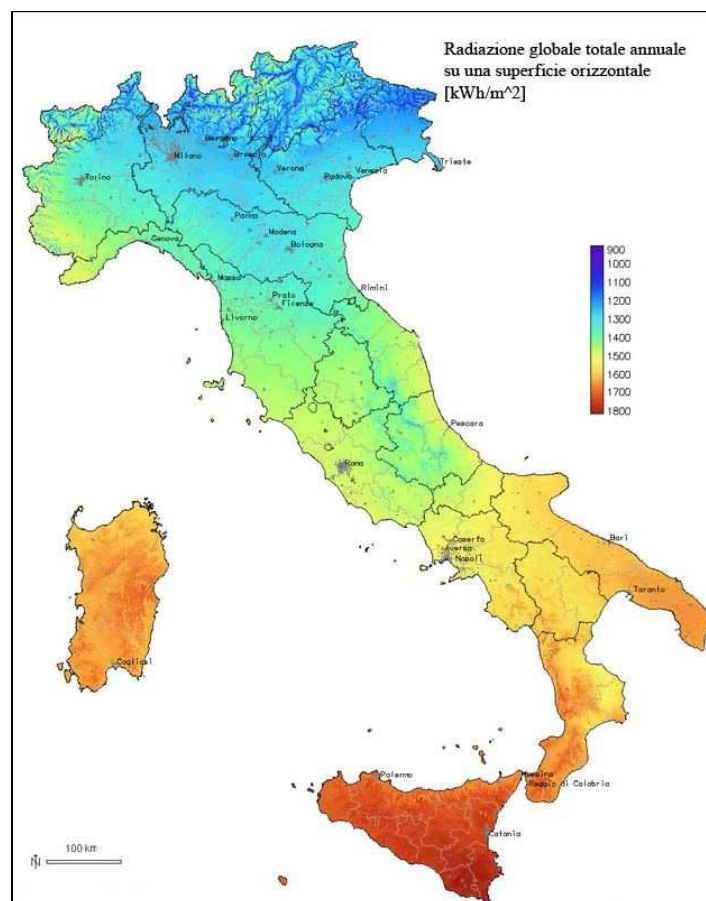
L'Italia è uno dei Paesi europei con il maggiore potenziale per lo sfruttamento dell'energia solare. Nonostante partisse da livelli molto bassi, il mercato italiano del solare termico ha registrato negli ultimi anni uno dei tassi di crescita più alti dell'Europa. Anche se negli anni '70 – '80 le campagne pro-solare hanno avuto un esito negativo a causa dell'alto numero di impianti malfunzionanti installati, a partire dalla metà degli anni '90 c'è stato un ritorno di interesse per l'energia solare, dovuto anche alle pressioni delle direttive europee. Questo mercato ha poi rivisto un periodo di forte sviluppo (Fig. 5.1) che va avanti ancora oggi, se pur legato alle politiche di governo.

Fig. 5.1 - Sviluppo del mercato solare termico in Italia



Va sottolineato inoltre, che l'Italia presenta condizioni meteorologiche molto favorevoli per lo sfruttamento dell'energia solare, come si può vedere nella Fig. 5.2, che mostra la radiazione solare incidente che arriva annualmente su un m² di superficie. Infatti, nonostante ci siano consistenti differenze fra nord e sud, in entrambi i casi la radiazione solare disponibile è maggiore della domanda pro-capite annuale di energia termica necessaria al settore residenziale. Con queste condizioni favorevoli e la disponibilità di una tecnologia affidabile ed efficiente, l'Italia mostra un alto potenziale economico e tecnico per l'utilizzo dell'energia solare.

Fig. 5.2 - Mappa della radiazione solare annuale sul territorio nazionale espressa come kWh/m²



Fonte: <http://www.petrolgas.it>

5.3. Applicazioni possibili

Il solar pond produce energia termica che poi può essere utilizzata tal quale, stoccata o sfruttata per altri scopi. Le applicazioni possibili interessano diversi campi: dissalazione di acqua, generazione di energia elettrica e altro ancora. Come fonte di energia termica lo sfruttamento interessa il riscaldamento di acqua e il riscaldamento di serre, stalle o altre applicazioni agricole a bassa temperatura. Un ulteriore utilizzo può essere inoltre quello legato allo sfruttamento dell'energia elettrica da destinarsi a comunità remote o a sistemi di cogenerazione.

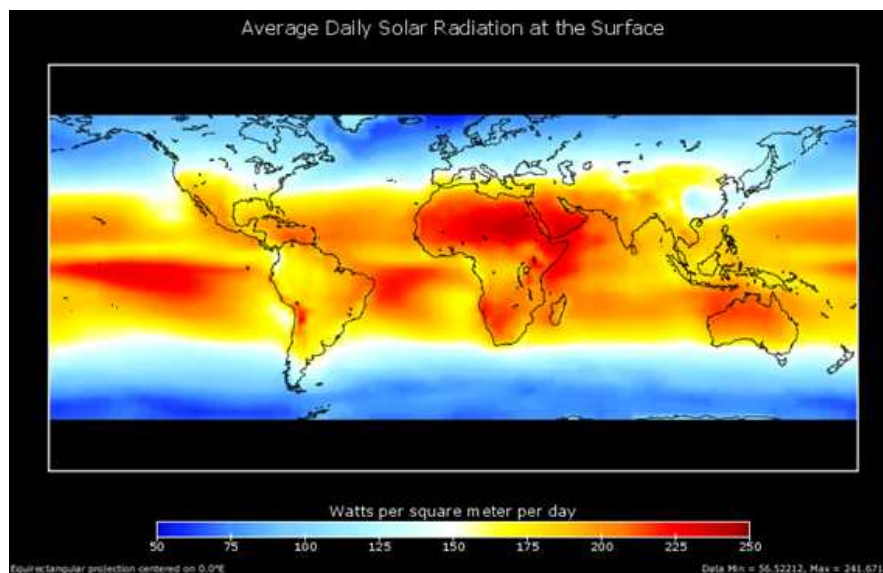
Nonostante tutte queste possibilità, però, lo sfruttamento migliore del sistema solar pond è come risorsa di energia per la desalinizzazione in regioni aride, dove c'è abbondanza di acqua salata e superficie libera e scarsità di acqua potabile. In questi casi, infatti, il solar pond non solo provvede all'energia richiesta per il processo, ma la soluzione salina concentrata che si ha come scarto e l'energia elettrica prodotta vengono usate per l'autoalimentazione sia salina che elettrica, così che il solar pond è autonomo anche in aree senza linee elettriche.

5.3.1. Desalinizzazione

La mancanza di acqua potabile in genere corrisponde a zone dove la radiazione solare è maggiore, in particolare nelle zone desertiche dove la radiazione media incidente è di 5 – 6 M kWh/d/km² (Fig. 5.3). Data la precarietà sempre maggiore delle risorse di combustibili fossili, per il futuro si deve pensare di adottare risorse rinnovabili economicamente e tecnicamente non proibitive. A questo scopo le condizioni ideali per lo sviluppo futuro di impianti di desalinizzazione a energia solare sono:

1. Operatività del sistema per periodi molto lunghi e garantiti anche in condizioni ambientali difficili
2. Capacità di adattamento alle fluttuazione stagionali e giornaliere della radiazione solare (nuvolosità, differenza giorno-notte,..)
3. Funzionamento automatico e di semplice gestione e manutenzione
4. Sistema di conversione dell'energia solare che sia a basso costo e adatto per l'installazione su larga scala.

Fig. 5.3 - Distribuzione della radiazione solare, media annua espressa in (kWh/m²)/g



Fonte: <http://blogs.cgdev.org/globaldevelopment/2008/02/a-solar-future-for-the-world-b.php>

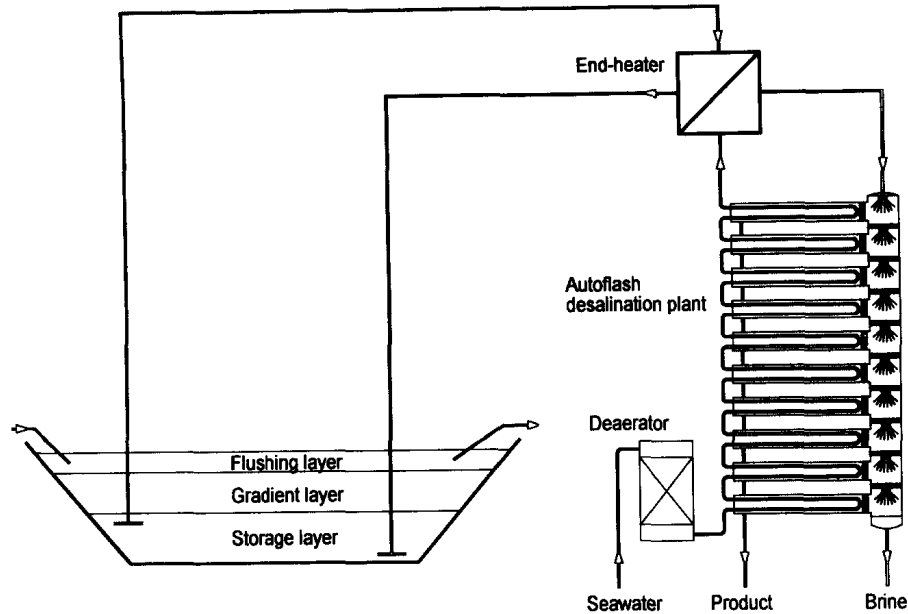
I metodi di dissalazione sono molti, ma solo pochi si prestano all'accoppiamento con la tecnologia solar pond. Uno di questi è la distillazione con flash multistadio (MSF), in cui l'acqua da dissalare viene riscaldata dallo scambiatore di calore alimentato dal pond e poi passa in una camera flash dove diventa in parte vapore e in parte ritorna allo scambiatore.

Il vapore ottenuto viene mandato nel sistema di distillazione in cui si procede con la condensazione. La distillazione avviene su step successivi in cui il processo viene ripetuto più volte fino ad ottenere le caratteristiche desiderate sia del fluido concentrato che di quello distillato.

L'accoppiamento solar pond – dissalazione rimane uno dei sistemi più economici di utilizzo della radiazione solare per la produzione di acqua potabile. Un esempio è il sistema Atlantis Autoflash (Fig. 5.4), sperimentato su piccola scala in Svizzera, ma studiato per l'applicazione in Nord Africa.

Gli aspetti chiave di questa configurazione riguardano la possibilità di operare in un range di temperatura compreso tra 30 e 95°C adattandosi così alle possibili variazioni termiche, l'output energetico può essere programmato per meglio soddisfare la domanda e l'impianto ha un consumo elettrico ausiliario nell'ordine di 2 kWh/m³.

Fig. 5.4 - Sistema Autoflash alimentato da un solar pond



Fonte: Szacs vay, Hofer-Noser, Posnansky (1999)

Nello studio citato è stato visto, inoltre, come gli alti costi legati alla realizzazione sono ammortizzati in solar pond di grande scala, mentre più difficilmente sono sostenuti in pond di piccole dimensioni.

5.3.2. Produzione di energia, sale e acqua potabile

Il sempre più crescente sfruttamento delle risorse idriche ha portato alla salificazione degli acquiferi e conseguenti problemi ambientali. Inoltre la rapida crescita dell'industria di dissalazione che produce sale di scarto del processo ha creato il problema dello smaltimento del sale. In luce di questa situazione si è pensato a impianti di dissalazione con ricircolo o sfruttamento del sale per altri scopi. Dato che il sistema solar pond è alimentato proprio da sale e acqua, è facile capire come ben si presti a tale scopo. Molti impianti di dissalazione basati su solar pond sono stati costruiti vicino alla costa o a preesistenti saline, in modo da avere disponibilità di acqua e sale a basso costo. Esempi sono Margherita di Savoia in Italia, sorto all'interno delle saline e vicino al mare, riempito utilizzando acqua marina e Bet Ha Arava in Israele sorto a 3 km dal bacino nord del Mar Morto da cui sfrutta l'acqua (particolarmente salata) a costo zero.

Per impianti non costieri è ancora più importante pensare a configurazioni a ciclo chiuso, in cui ci sia il riuso del sale di scarto e proprio per questo sono nati impianti di cogenerazione, dove la produzione di acqua potabile e sale è più efficiente. È stato visto, infatti, che gli impianti in cui la produzione di acqua e la generazione di energia elettrica sono combinate, il consumo di combustibili fossili è minore se confrontato con impianti dove i due processi sono indipendenti. L'utilizzo di un solar pond come generatore di energia elettrica per il circuito non solo ha i benefici intrinseci dell'usare una risorsa rinnovabile vantaggiosa dal punto di vista sia economico che ambientale, ma può anche provvedere a supportare molti altri usi. Il calore in eccesso può infatti essere usato per alimentare la produzione di pesci, gamberetti e betacarotene (estratto da alghe).

5.3.3. Maricoltura

Un'ulteriore applicazione della tecnologia solar pond, che ha preso spazio solo recentemente, è quella che prevede lo sfruttamento del lago solare per innalzare la temperatura invernale delle vasche dedicate all'itticoltura, in modo da incrementare la produzione. È stato visto infatti, che un aumento di temperatura di soli 10°C favorisce tassi di crescita dei pesci molto più alti, fino a 6 volte maggiori rispetto alle condizioni normali. È facile capire come questa strategia ben si adatta alla localizzazione in zone desertiche dove c'è abbondanza di sale, i liner non sono indispensabili e il pesce prodotto trova largo impiego nel commercio ittico.

Come già accennato si possono coltivare pesci di diverse specie, gamberetti e alghe. Un particolare tipo di crostaceo (*Artemia Salina*) ha il vantaggio di sfruttare i nutrienti prodotti dalla coltura ittica e costituire, a sua volta, un alimento per piccoli pesci, con un'importante applicazione commerciale perché usato nei negozi di animali come cibo o integratore per pesci tropicali. La produzione di alghe invece può avvenire in bacini di evaporazione correlati al pond e, anche in questo caso, si ha un ottimo riscontro commerciale. La *Dunaliella salina* viene sfruttata per l'estrazione di betacarotene, mentre altre specie di alghe saline trovano facili applicazioni per altri scopi.

5.4. Progetto di una unità produttiva per comunità rurale

In luce di quanto detto precedentemente a proposito dei meccanismi flessibili come strumento per raggiungere le quote di riduzione della CO₂ stabilite, una possibile applicazione per l'Italia è quella del Clean development

mechanism (CDM) (vedi paragrafo 5.1.3.). Questo meccanismo rappresenta una grande opportunità non solo per l'Italia, ma anche per i Paesi in via di sviluppo coinvolti.

In considerazione del rapporto ventennale instaurato tra la comunità scientifica della Tunisia e l'Università Politecnica delle Marche, dell'acquisita conoscenza delle condizioni ambientali e del favorevole accoglimento da parte delle autorità politiche tunisine, si è scelto di ideare un possibile progetto CDM in Tunisia. Il progetto ha come oggetto il trasferimento della tecnologia solar pond ad una comunità nomade dell'area desertica a sud del Paese. Questa zona presenta, dal punto di vista idrogeologico, delle condizioni particolari. Sono presenti, infatti delle falde acquifere caratterizzate da acqua salata a bassa densità e quindi terreni saturi di sale. Questa proprietà permetterebbe di realizzare solar pond sprovvisti di liner, in quanto il sistema è già impermeabile né c'è pericolo di contaminazione. La mancanza del liner farebbe diminuire i costi di realizzazione dell'impianto del 30 – 40% e le caratteristiche idrogeologiche permetterebbe di ricavare il sale necessario al riempimento e al mantenimento del pond dall'acqua di falda tramite evaporazione.

Le autorità tunisine inoltre intendono realizzare per la comunità nomade un progetto che consenta di avere vantaggi sociali ed economici. Sociali perché il singolo individuo si troverebbe ad avere un reddito, migliorando così le proprie condizioni di vita, ed economici per l'intero Paese perché si amplierebbe il settore agricolo. Le condizioni climatiche favorevoli, la disponibilità di acqua dissalata, energia termica ed energia elettrica fornita dal solar pond permetterebbero infatti, di costruire intorno al solar pond un centro agricolo in grado di produrre frutta, ortaggi, cereali (foraggio), ma anche allevamenti di bestiame.

5.4.1. Sito in esame

Nella presente tesi è stato preso in considerazione un piccolo sito della Tunisia, paese caratterizzato per oltre la metà del suo territorio da condizioni desertiche. A causa della mancanza d'acqua e del propagarsi del deserto, si assiste da diverso tempo alla migrazione di intere popolazioni verso condizioni di vita migliori. Per cercare di arginare il problema dell'abbandono dei territori, che incrementa il processo di desertificazione, sono stati studiati degli interventi mirati che sfruttino le risorse locali per progetti eco-sostenibili.

Il progetto della presente tesi ha preso in esame il sito di El Bibane – Jderia, una piccola comunità lungo la costa mediterranea nel Sud-Est della Tunisia (Fig. 5.5 e 5.6) che occupa più di 6500 ha.

Fig. 5.5 - Mappa della Tunisia. Segnata in rosso la posizione del sito in esame



Fonte: <http://www.popvision.com/agenzietui/mappa-tunisia>

Fig. 5.6 - Foto satellitare del sito di El Bibane – Jderia



Fonte: Google Earth

La popolazione totale del sito è di 1620 abitanti, le cui attività principali sono la pesca e l'agricoltura. È chiaro che il limite maggiore è rappresentato dalla disponibilità d'acqua dolce, presente in determinati periodi dell'anno solo grazie alle scarse precipitazioni. Per farsi un'idea della criticità della situazione basti pensare che per il centro di El Bibane l'acqua viene fornita con l'ausilio di due camion cisterne (rispettivamente di 5 m³ e 11 m³) che la trasportano due volte al giorno da una fonte situata a 20 km di distanza e viene poi immagazzinata e venduta. Per Jderia invece esiste solo un sistema familiare di stoccaggio dell'acqua piovana. La grande disponibilità di terra è la base per l'attività agricola, che però necessita di acqua per l'irrigazione e di energia per il riscaldamento di serre, così da poter coltivare prodotti da esportare sul mercato europeo.

5.4.2. Ipotesi di progetto

Prima di tutto è stata considerata la crescita demografica che il sito subirà nei prossimi anni, in modo tale da realizzare un progetto adeguato alle esigenze della popolazione attuale, ma anche di quella futura, stimando così il fabbisogno di acqua potabile per uso domestico (Tab. 5.1).

Tab. 5.1 - Evoluzione nel tempo della popolazione e del fabbisogno di acqua potabile

	2010			2015		
	Abitanti	H2O Inverno (m3/d)	H2O resto anno (m3/d)	Abitanti	H2O Inverno (m3/d)	H2O resto anno (m3/d)
Locali	1897	151,72	227,58	2053	164,16	246,25
Stagionali	2107	168,60	252,87	2280	182,41	273,55
Totale	4004	320,32	480,45	4333	346,57	519,8

Fonte: elaborazione dati Ecole Nationale d'Ingenieurs de Tunis

Per quanto riguarda la produzione di acqua potabile, il centro di El Bibane è allacciato alla rete elettrica e per piccoli fabbisogni si può anche pensare all'utilizzo di un impianto Reverse Osmosis (R.O.), cioè dissalazione attraverso una membrana osmotica che trattiene la soluzione salina da una parte impedendone il passaggio e permette di ricavare l'acqua dolce dall'altra. Per il sito di Jderia, a causa della mancanza dell'allaccio alla rete elettrica, si rendono necessarie tecnologie di dissalazione basate sulla radiazione solare.

Nella Tab. 5.2 vengono mostrati i fabbisogni di acqua dolce necessaria all'irrigazione, divisi in base al tipo di coltura che è stata scelta in base alla idoneità geo-climatica ed economica.

Tab. 5.2 - Fabbisogni di acqua per l'irrigazione di diverse colture e confronto con le quote di precipitazione. Valori espressi in m3/1500m2

	Pomodoro		Melone		Fragola	Bisogno giornaliero m3/1500m2	Pioggia m3/1500m2
	1° ciclo	2° ciclo	1° ciclo	2° ciclo			
Gennaio	-	1,15	0,3	-	0,92	2,37	14,5
Febbraio	0,66	-	0,62	-	1,1	2,38	7,5
Marzo	1,7	-	0,95	-	0,8	3,45	15,7
Aprile	2,31	-	2,21	-	1,17	5,69	7,6
Maggio	2,15	-	2,5	-	0,55	5,20	2,1
Giugno	-	-	2,5	-	-	2,50	1,5
Luglio	-	-	-	-	-	0,00	0
Agosto	-	0,72	-	-	-	0,72	1,1
Settembre	-	1,5	-	0,65	1,2	3,35	5,65
Ottobre	-	2	-	1	1,1	4,10	0
Novembre	-	2	-	1,5	1,15	4,65	1,5
Dicembre	-	1,3	-	1,4	0,96	3,66	21

Fonte: elaborazione dati Ecole Nationale d'Ingenieurs de Tunis

Il confronto dei fabbisogni con l'acqua dolce disponibile grazie alle precipitazioni, permette di calcolare quelli che sono i deficit o i surplus mensili, pur considerando che le precipitazioni possono subire forti variazioni di anno in anno in base al comportamento climatico.

Grazie alla contemporanea applicazione di dissalazione e riscaldamento di serre, lo sfruttamento dell'energia solare rimane l'unica soluzione applicabile. In particolare è stato assunto che ogni famiglia sia provvista di una serra, per un totale di 150 serre, divise in base al tipo di coltura come segue:

- 50 serre per il pomodoro
- 50 serre per la fragola
- 50 serre per il melone

Tenendo conto dei parametri relativi al meteo, alle proprietà del suolo e alla temperatura di germogliazione e crescita delle piante, sono stati calcolati i fabbisogni di energia termica riassunti nella Tab. 5.3.

Tab. 5.3 - Fabbisogni di energia per il riscaldamento di serre. Valori espressi in kW

	Pomodoro		Melone		Fragola	Bisogno di Energia	
	1° ciclo	2° ciclo	1° ciclo	2° ciclo		3 serre	150 serre
Gennaio	-	39,30	31,90	-	16,90	88,10	4405
Febbraio	36,30	-	36,25	-	29,50	102,05	5103
Marzo	35,25	-	39,10	-	20,25	94,60	4730
Aprile	25,80	-	25,75	-	10,60	62,15	3108
Maggio	5,25	-	8,50	-	-	13,75	688
Giugno	-	-	-	-	-	0	0
Luglio	-	-	-	-	-	0	0
Agosto	-	-	-	-	-	0	0
Settembre	-	-	-	0,45	-	0,45	23
Ottobre	-	1,00	-	0,48	-	1,48	74
Novembre	-	25,15	-	0,48	-	25,63	1282
Dicembre	-	40,10	-	0,48	-	40,58	2029

Fonte: elaborazione dati Ecole Nationale d'Ingenieurs de Tunis

Dalla Tab. 5.3 si può facilmente dedurre che il periodo che richiede maggior energia termica è quello da Novembre a Marzo, con un picco nel mese di Febbraio. La media mensile dell'energia necessaria per il riscaldamento delle serre è di 37 kW/500m².

Anche se si potrebbero pensare ad altre tecnologie per lo sfruttamento dell'energia solare, il sistema solar pond è l'unico in grado di fornire energia termica tutto l'anno, grazie allo strato di fondo che, come già detto, ha anche la funzione di immagazzinare il calore. Il sito in esame si trova inoltre a poca distanza dalle saline di Zarzis (Fig. 5.7), per cui la grande disponibilità di terreno e sale a costo zero rendono il solar pond alquanto competitivo.

Fig. 5.7 - Foto satellitare delle saline di Zarzis situate nelle vicinanze del sito di El Bibane – Jderia



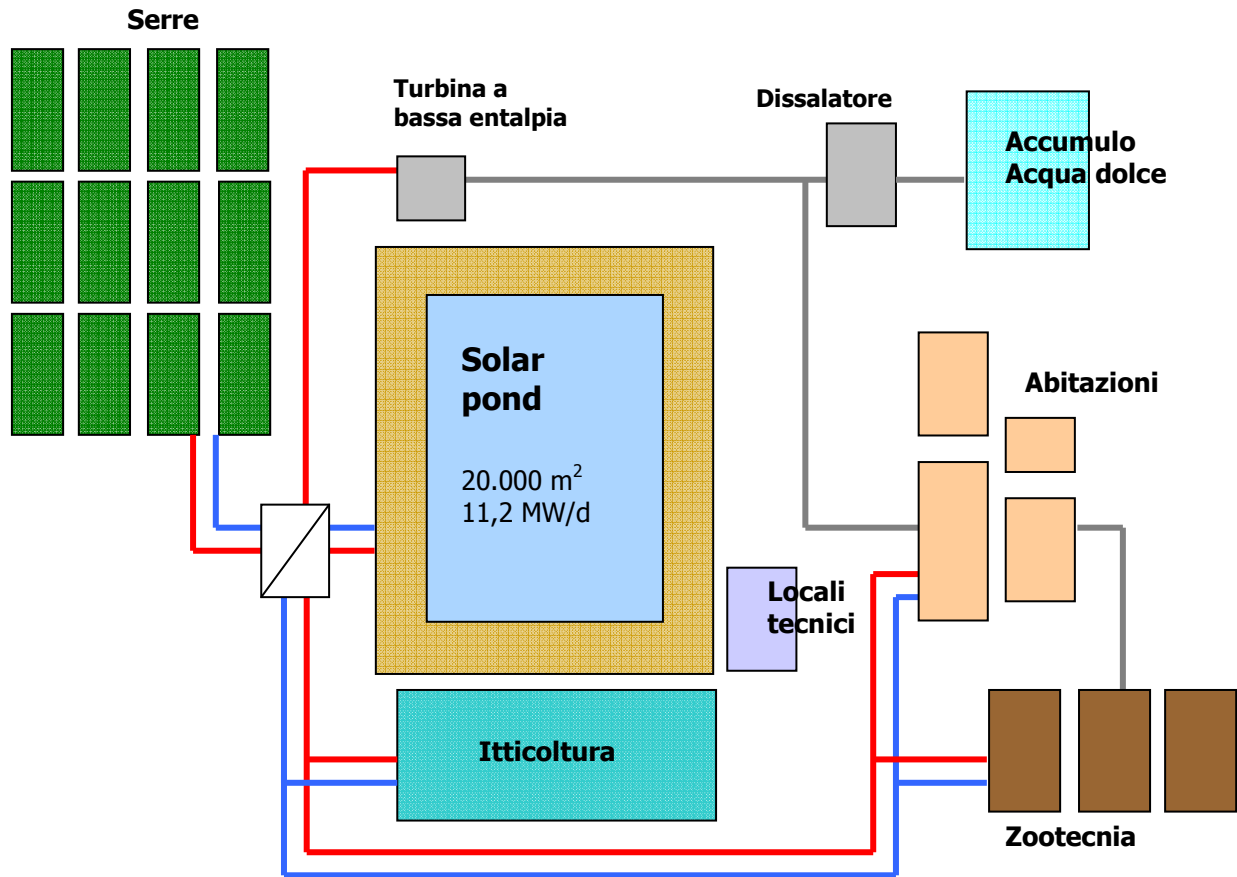
Fonte: Google Earth

Va inoltre considerato che l'uso ottimale del solar pond è di tipo alterno. Il periodo estivo è caratterizzato da alte temperature, ma scarsissime precipitazioni, per cui non è necessario il riscaldamento di serre, ma lo è la disponibilità di acqua per uso domestico e agricolo. Nel periodo invernale, al contrario, si ha bisogno di calore per le serre ma non di acqua, sufficientemente fornita grazie alle piogge. Si deduce quindi che l'ideale è di destinare il sistema alla produzione di acqua dissalata per i sei mesi che vanno da Maggio a Ottobre e alla fornitura di energia termica di riscaldamento per i restanti sei mesi.

Valutate le quantità di acqua ed energia termica necessarie, l'efficienza del sistema, le perdite di calore e la radiazione media della zona considerata, si è stimato che la superficie del solar pond per il progetto in esame è di 20000 m², con una configurazione quadrata 140 m x 140 m. Questa progettazione permette di produrre l'acqua necessaria per uso domestico e agricolo nell'intero anno tutta nei sei mesi estivi e poi immagazzinarla. Mentre per la produzione invernale di energia termica va considerato che i valori di radiazione solare ed efficienza sono inferiori, a causa della stagione e della maggiore dispersione del calore. La configurazione 140 m x 140 m però, permette di fornire giornalmente 11,2 MW di energia termica, che sono ampiamente sufficienti a ricoprire la richiesta necessaria per il riscaldamento delle serre. Il surplus di calore così

ottenuto, permetterebbe inoltre di affiancare al solar pond una vasca laterale da destinarsi all'itticoltura. Il calore avrebbe l'importante scopo di mantenere costante la temperatura dell'acqua, prevenendo sbalzi termici sia giornalieri che stagionali. Il raffreddamento notturno dovuto alla forte escursione termica tipica delle zone desertiche non ha effetto sul sistema del pond grazie alla sua stabilità e al suo isolamento termico. Data la bassa profondità di una vasca per l'itticoltura, però questa considerazione non è più valida, ed è chiaro che il problema maggiore è proprio la stabilità termica. Problema risolvibile grazie all'energia termica fornita dal solar pond (Fig. 5.8).

Fig. 5.8 - Schema del progetto ipotizzato per il sito preso in esame



- Energia termica (freddo)
- Energia termica (caldo)
- Energia elettrica

Fonte: nostra elaborazione grafica

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Ahmed M., A. Arakel , D. Hoey and M. Coleman (2001), "Integrated power, water and salt generation: a discussion paper", *Desalination*, vol. 134, pp 37-45

APAT & IRSA-CNR (2003), *Metodi Analitici per le acque - Parametri fisici, chimici e chimico-fisici*, Volume 2000, pp. 177-182

Bindra S. P. and Walid Abosh (2001), "Recent developments in water desalination", *Desalination* vol. 136, pp 49-56

BoAax M. and A. Harmim (2001), "Effect of climatic conditions on the performance of a simple basin solar still: a comparative study", *Desalination* vol. 137, pp 15-22

Brissaud F. (2008), "Criteria for water recycling and reuse in the Mediterranean countries", *Desalination* vol. 218, pp 24–33

Caruso G., A. Naviglio, P. Principi, E. Ruffini (2001), "High-energy efficiency desalination project using a full titanium desalination unit and a solar pond as the heat supply", *Desalination* vol. 136, pp 199-212

Cavallo, D., Pusceddu, A., Danovaro, R., Giangrande, A. (2007) Particulate organic matter uptake rates of two benthic filter-feeders (*Sabella spallanzanii* and *Branchiommma luctuosum*) candidates for the clarification of aquaculture wastewaters. *Marine Pollution Bulletin* 54, 622-625

Chiarelli F. (1990), "Solar pond: water clarification", *Proceedings of the 2nd International Conference Progress in Solar Ponds Rome (Italy)*

Collado F. and P. Lowrey (1991), "Temperature, thermal efficiency and gradient performance from two seawater-sz solar ponds", *Solar Energy*, Vol. 46, No 6, pp 361-370

El-Kady M. and F. El-Shibini (2001), "Desalination in Egypt and the future application in supplementary irrigation", *Desalination* vol. 136, pp 63-72

Folchitto S. (1991), "Seawater as salt and water source for solar ponds", *Solar Energy*, Vol. 46, No 6, pp 343-351

APAT - IRSA/CNR (2003) *Analytical methods for water analysis. Manuali e linee guida - 29/2003* (eds. Belli M., Centioli D., de Zorzi P., Sansone U. , Capri S., Pagnotta R., Pettine M.) Consiglio Nazionale delle Ricerche - Istituto di Ricerca sulle Acque - CNR-IRSA ISBN

Hassab M. A., I. A. Tag and W. A. Kamal (1989), Problems encountered in operating salt gradient solar ponds in the Arabian Gulf region, *Solar Energy*, Vol. 43, No 3, pp 169-181

Hull, J.R., Nielsen, C.E., Golding, P. (1989) *Salinity gradient solar ponds*, CRC Press, Inc. Boca Raton, Florida (USA)

Hull J. R., D. L. Bushnell, D.G. Sempsrote and A Pena (1989), "Ammonium sulphate solar pond: observations from small-scale experiments", *Solar Energy*, Vol. 43, No 1, pp 57-64

IPCC, 2007: *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp

Kirk J. T. O. (1988), "Effect of scattering and absorption on solar pond efficiency", *Solar Energy* Vol. 40, No 2, pp 107-116

Lokiec F. and G. Kronenberg (2001), "Emerging role of BOOT desalination projects", *Desalination* vol. 136, pp 109-114

Lowrey P., R. Ford, F. Collado, J. Morgan and E. Frusti (1990), "Combining Mariculture and Seawater – Based Solar Ponds", *Journal of Solar Energy Engineering* Vol. 112, pp 90-97

Lu H., J. C. Walton, A. H.P. Swift (2001), "Desalination coupled with salinity-gradient solar ponds", *Desalination* vol. 136 pp 13-23

Noble, R.T., J.A. Fuhrman (1998), "Use of SYBR Green I for rapid epifluorescence counts of marine viruses and bacteria", *Aquatic Microbial Ecology* 14: 113-118

Safi M.J. (1999), The solar pond in Tunis, *European Desalination Society Newsletter*, Issue 7

Safi M.J., P. Principi and E. Ruffini (2003), The use of renewable energies for sustainable development: the case of El Bibane and Jderia in south Tunisia, project work

Sail M.J., A. Korchani (1999), "Cogeneration applied to water desalination: Simulation of different technologies", *Desalination* vol. 125, pp 223-229

Sandaa R.A., Foss Skjoldal E., Bratbak G. (2003), "Virioplankton community structure along a salinity gradient in a solar saltern", *Extremophiles* 7: 347-351

Szacsavay T., P. Hofer-Noser and M. Posnansky (1999), "Technical and economic aspects of small-scale solar-pond powered seawater desalination system", *Desalination* vol. 122, pp 185-193

Tabor H. Z. (1981), Solar ponds, *Solar Energy* vol. 27, pag. 181

Velmurugana V. and K. Sritharb (2007), "Solar stills integrated with a mini solar pond — analytical simulation and experimental validation", *Desalination* vol. 216, pp 232–241

Virka G.S., M.G. Ford, B. Dennessb, A. Ridett and A. Huntfe (2001), "Ambient energy for low-cost water desalination", *Desalination* vol. 137 pp 149-156

Wang, J., Yagoobi, S. (1994), "Effects of halobacteria and selected chemicals on radiation transmission in salt water", *Solar Energy* 52, 411-418

Wang, J., Yagoobi, S. (1995), "Effect of water turbidity on thermal performance of a salt gradient solar pond", *Solar Energy* 54, 301-308

Zangrando F. (1980), "A simple method to establish salt gradient solar ponds", *Solar Energy* 25, 467-470

APPENDICE

List of Annex I Parties to the Convention

Australia	Portugal
Austria	Romania
Belarus	Russian Federation
Belgium	Slovakia
Bulgaria	Slovenia
Canada	Spain
Croatia	Sweden
Czech Republic	Switzerland
Denmark	Turkey
Estonia	Ukraine
European Community	United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland
Finland	United States of America
France	
Germany	
Greece	
Hungary	
Iceland	
Ireland	
Italy	
Japan	
Latvia	
Liechtenstein	
Lithuania	
Luxembourg	
Monaco	
Netherlands	
New Zealand	
Norway	
Poland	