



PROGETTO LIFE "REWETLAND"

*Analisi del bilancio idrologico del sistema
Lago di Fogliano - Lago dei Monaci
e definizione di strategie di riduzione dei
fenomeni di eutrofizzazione e salinizzazione*



Fase 5 - Quadro propositivo

Relazione di sintesi



CODICE DOCUMENTO

ELABORATO

2	5	5	1	-	0	5	-	0	0	3	0	0	.	D	O	C	LD	5.3
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	-----

00	GIU. 12	L. DUTTO	M.BUFFO	M.BUFFO	
REV.	DATA	REDAZIONE	VERIFICA	AUTORIZZAZIONE	MODIFICHE

RIPRODUZIONE O CONSEGNA A TERZI SOLO DIETRO SPECIFICA AUTORIZZAZIONE



Gruppo di lavoro

Il presente studio di *Analisi del bilancio idrologico del sistema lago di Fogliano – lago di Monaci e strategie di riduzione dei fenomeni di eutrofizzazione e salinizzazione* è stato curato e redatto dal seguente gruppo di lavoro.

- *Michele Buffo*, ingegnere civile iscritto all'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Torino al n.4580L, Responsabile della Divisione Ricerca Applicata di Hydrodata S.p.A., responsabile e coordinatore generale dello studio, responsabile scientifico.
- *Luca Dutto*, ingegnere civile iscritto all'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Cuneo al n.A1721, coordinatore del gruppo di lavoro, esperto nelle tematiche idrologiche e di gestione delle risorse idriche.
- *Andrea Pedroncini*, ingegnere per l'Ambiente e il Territorio iscritto all'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Genova al n.8223A, Responsabile del settore di modellistica numerica applicata all'ambiente marino-costiero per DHI Italia, responsabile delle applicazioni numeriche.
- *Norberto Tolomieri*, geologo, esperto in idrogeologia e nelle misurazioni idrometriche, responsabile delle attività di monitoraggio e rilievo.
- *Cesare Puzzi*, veterinario ittologo iscritto all'Ordine dei Medici Veterinari della Provincia di Milano al n.1648, responsabile scientifico per le tematiche ecologico-ambientali.
- *Alessandra Ippoliti*, biologa iscritta all'Ordine Nazionale dei Biologi al n.053869, esperta di ecologia dei corpi idrici, gestione e conservazione delle risorse ambientali e faunistiche degli ecosistemi acquatici.
- *Giovanni Mastrobuoni*, dottore in Scienze Naturali, esperto in attività di monitoraggio e indagini in campo biologico (in particolare chiroterofauna e ittiofauna), team di monitoraggio e rilievo.
- *Samantha Francescato*, dottoressa in Scienze Naturali, indirizzo Conservazione della Natura e delle sue risorse, team di monitoraggio e rilievo.

Si ringraziano inoltre per la gentile disponibilità nella condivisione di dati e informazioni e l'assistenza necessaria per l'esecuzione delle attività in sito:

dott. Sergio Zerunian, dott. Massimo Cecchetti (*Corpo Forestale dello Stato*);

dott.ssa Nicoletta Valle, dott. Enrico Sorabella (*Provincia di Latina*);

dott.ssa Vera Sangiorgi (*ARPA Lazio, Sezione provinciale di Latina*).

INDICE

1. PREMESSA	4
2. INQUADRAMENTO E STRUTTURA DELLO STUDIO	4
3. QUADRO DOCUMENTALE E ATTIVITÀ DI MONITORAGGIO IN SITO	7
4. RAPPRESENTAZIONE DEL SISTEMA MEDIANTE MODELLI NUMERICI	9
5. ANALISI DELL'ASSETTO ECOLOGICO	13
6. SINTESI DEI PRINCIPALI RISULTATI	18
6.1 Bilancio idrologico	18
6.2 Scenari di intervento	19
6.2.1 Lago di Fogliano	19
6.2.2 Lago di Monaci	20
6.2.3 Sintesi dei risultati ottenuti	21
6.3 Considerazioni conclusive	24

1. PREMESSA

Lo studio di *Analisi del bilancio idrologico del sistema lago di Fogliano – lago dei Monaci e strategie di riduzione dei fenomeni di eutrofizzazione e salinizzazione* è stato svolto su incarico dell'Ente Parco Nazionale del Circeo (nel seguito anche PNC) dal Raggruppamento Temporaneo di Imprese tra Hydrodata S.p.A. (mandataria) e DHI Italia (mandante), nell'ambito del progetto europeo LIFE "Rewetland", nel periodo novembre 2010 - febbraio 2012.

Di seguito si fornisce una sintesi non tecnica dei principali risultati ottenuti nelle diverse fasi dello studio, il quale ha portato ad un approfondimento di dettaglio della conoscenza delle dinamiche idrologiche ed ecologiche dell'area in esame relativamente alla condizione attuale, e all'allestimento di strumenti modellistici in grado di rappresentare tali dinamiche e consentire la simulazione degli effetti di possibili interventi.

In particolare sono stati proposti alcuni possibili scenari mirati al miglioramento del livello attuale di qualità ambientale, definiti a seguito dei confronti avuti con il PNC e con i professionisti incaricati del *Progetto Pilota di un ecosistema filtro nell'area del Parco Nazionale del Circeo*, nell'ambito del medesimo progetto LIFE.

2. INQUADRAMENTO E STRUTTURA DELLO STUDIO

La genesi dei laghi costieri dell'area pontina che ricadono all'interno del Parco Nazionale del Circeo è legata all'azione di sbarramento ad opera di cordoni sabbiosi (dune) progressivamente emersi e modellati dai venti. Il promontorio del Circeo ha favorito la loro formazione e conservazione, smorzando e deviando l'intensità delle correnti marine costiere e permettendo la crescita e la conservazione della duna per quasi 30 km di estensione. La duna "recente" separa i quattro laghi costieri (Fogliano, Monaci, Caprolace, Sabaudia) dal mare, formando un'ampia insenatura che si protende fino ad Anzio.

I laghi sono caratterizzati da scambi continui con l'acqua marina, sia attraverso un sistema di canali attivati dall'equilibrio delle correnti di marea e dalle frequenti mareggiate, sia attraverso il deflusso delle acque di falda, sia attraverso interventi diretti dell'uomo (pompaggi). Di conseguenza, le acque dei laghi sono salmastre, con un carico salino molto vicino a quello delle acque marine.

L'area di alimentazione dei laghi costieri (bacino) è ampia circa 140 km²; in essa ricade anche la città di Sabaudia e un numero considerevole di insediamenti sparsi. Il bacino è sede di alcune industrie e di colture agrarie intensive, che tra un lago e l'altro si interpongono pascoli e campi coltivati. È praticato anche l'allevamento, soprattutto di bufale.

Dei due laghi oggetto dello studio, quello di Fogliano, il più settentrionale, si estende per circa 404 ettari, ha una profondità massima di 2 m e una profondità media dell'ordine del metro, per un volume idrico medio di circa 4,0 Mm³ (milioni di metri cubi).

Prima degli interventi di bonifica, il lago riceveva le acque del canale di Mastropietro, del Rio Martino, del Fosso Cicerchia e di altri canali minori; esso era inoltre in collegamento con il mare mediante la "Foce Vecchia", aperta sul Rio Martino, attraverso la quale veniva regolato il livello di tutti e quattro i laghi, allora

collegati in serie. Nel 1920 fu scavata la cosiddetta "Foce Nuova" o "Foce del Duca" (dal Duca Caetani che la fece realizzare), per ovviare ai frequenti interramenti della Vecchia.

Il Lago di Monaci, trapezoidale, si estende per circa 95 ettari, con una profondità media inferiore al metro e una profondità massima di circa 1,4 m. Il volume idrico medio è pari a circa 1,0 Mm³. Originariamente esso era collegato con quello di Caprolace tramite il Canale Papale, e con Fogliano tramite un altro breve canale.



Figura 1 – Imbocco della Foce Nuova di Fogliano (a sinistra) e sbocco a mare (ovvero nel tratto terminale del rio Martino) della Foce di Monaci, regolata da paratoie (a destra).

Nell'ambito dei lavori di bonifica dell'Agro Pontino (1926-1936) vennero costruiti collettori periferici allo scopo di impedire che le acque provenienti dalle zone più elevate potessero arrivare liberamente ai laghi. Con la realizzazione o sistemazione dei canali principali (in particolare il canale delle acque medie / Rio Martino) e la realizzazione di idrovore, gli apporti ai laghi vennero regolati.

Entrambi i laghi furono messi in comunicazione con il mare mediante foci artificiali costituite da un canale sfociante nel tratto terminale del Rio Martino (di nuova realizzazione per il Monaci, riattivando la Foce Vecchia per Fogliano). Tali canali vennero anche muniti di lavorieri per la pesca.

L'idrovora di Capo Portiere, collegata tramite un breve canale a Fogliano, poteva essere utilizzata sia per immettere acqua nel lago che per espellerla. Per Monaci si eliminò la possibilità di uno scolo diretto delle acque dai terreni di bonifica circostanti, e l'apporto di acqua dolce venne assicurato da una derivazione dal Rio Martino, sul lato settentrionale.

A inizio degli anni '60 le condizioni ambientali dei laghi venivano giudicate "*abbastanza buone ed ottime*" in alcuni periodi dell'anno. Successivamente, a causa dell'aumento dei livelli di inquinamento degli immissari (in particolare del rio Martino, ma anche nella rete di canali minori), principalmente dovuto alla presenza di elevati carichi di sostanze *nutrienti* (fosforo e azoto) di origine domestica e agricola, cominciarono a manifestarsi all'interno dei laghi, durante il periodo estivo, situazioni di *eutrofizzazione* con conseguenti fenomeni di anossia (grave carenza di ossigeno), causa di frequenti morie di pesci.

L'eutrofizzazione, meglio descritta nel seguito, è un processo degenerativo delle acque indotto da eccessivi apporti di nutrienti, ovvero sostanze ad effetto fertilizzante. L'accumulo di elementi come l'azoto e il fosforo causa la proliferazione di alghe microscopiche che, a loro volta, non essendo smaltite dai consumatori primari, determinano una maggiore attività batterica di decomposizione; aumenta così il consumo globale di ossigeno, e la riduzione di quest'ultimo può giungere a provocare la morte dei pesci.

Negli anni '80 il regime idraulico dei laghi fu modificato isolandoli completamente dal reticolo dei canali di acqua dolce. L'apporto delle acque del Rio Martino fu impedito con l'installazione di paratoie di foce, in modo da poter comunque usare il canale per far defluire le acque dei laghi in condizioni di livello elevato e in regime di bassa marea.

Il lago di Fogliano venne posto in comunicazione con il mare mediante la Foce Nuova, discosta dal rio Martino. Presso Monaci vennero installate due pompe per l'immissione di acqua marina, originariamente invasata nel canale Papale, collegato con il mare tramite la Foce della Lavorazione. Il nuovo regime idraulico determinò però un'alterazione di alcuni terreni, posti a quote prossime a quella del mare, i quali venivano a contatto con l'acqua salmastra del canale; l'acqua immessa nel lago inoltre era ricca di nutrienti e fertilizzanti provenienti dalle coltivazioni agricole. Per tale motivo l'Ente Parco programmò la realizzazione di una condotta della lunghezza di 1,8 km, interrata, di collegamento diretto tra la Foce della Lavorazione ed il lago di Monaci per l'immissione di acqua dal mare; l'impianto realizzato consente tuttora di pompare nel lago una portata di circa 0,5 m³/s.

L'eliminazione degli apporti di nutrienti ai laghi (con l'eccezione dei contributi provenienti dalla falda e dalle acque che in condizioni di piena sfiorano nei laghi dal rio Martino, al di sopra delle paratoie di foce) ha prodotto un graduale miglioramento delle condizioni ambientali dei laghi, riducendo fortemente l'occorrenza di crisi anossiche.

Attualmente le condizioni ambientali di Fogliano risultano migliori, a causa prevalentemente dello scambio diretto e continuo con il mare e di una migliore circolazione; Monaci è invece in condizioni di equilibrio più delicato, per il minore volume idrico e per l'idrodinamica completamente artificiale.

In entrambi i laghi però l'assenza di apporti di acqua dolce non meteorici fa sì che nel periodo estivo (caratterizzato da scarse piogge e elevate temperature) i fenomeni di evaporazione innalzino il livello di salinità a valori anche superiori a quelli marini, con effetti negativi sulla diversità delle biocenosi¹ presenti.

L'importanza ambientale delle lagune costiere salmastre (condizioni intermedie tra le acque dolci e quelle salate) risiede infatti nella ricchezza di specie che la popolano; in condizioni che diventano marcatamente saline solo le specie marine continuano a risiedervi, con effetti anche sui livelli trofici (ovvero della catena alimentare) superiori, quali ad esempio l'avifauna. Il lago di Monaci in particolare risente più gravemente di questo fenomeno, prevalentemente a causa del modesto volume, e presenta talvolta concentrazioni saline tali da risultare poco gradite anche da molte specie marine.

Gli obiettivi principali dello studio sono stati quindi due:

- il monitoraggio e l'analisi delle condizioni ambientali attuali dei due laghi, e la loro descrizione mediante strumenti di rappresentazione modellistica (modelli numerici);

¹ Complesso di popolazioni animali e vegetali che vivono e interagiscono fra loro in uno stesso ambiente, o biotopo, con il quale formano un ecosistema.

- la proposta e la valutazione degli effetti di possibili interventi volti a mitigare le criticità esistenti, prevalentemente mediante una parziale reimmissione di acque dolci nei laghi, previo trattamento (con sistemi di fitodepurazione) per ridurre le concentrazioni di inquinanti.

Lo studio, per quanto riguarda la caratterizzazione e rappresentazione modellistica dello stato attuale (primo obiettivo), è stato articolato in 4 fasi, che non rappresentano una rigida successione cronologica bensì una suddivisione delle attività in tematiche profondamente integrate tra loro, in quanto lo sviluppo di ognuna incide su quello delle altre.

In particolare le fasi, descritte nei capitoli seguenti, sono strutturate come segue:

1. Quadro conoscitivo;
2. Indagini in campo;
3. Analisi del bilancio idrologico;
4. Analisi dell'assetto ecologico.

La quinta fase (Quadro propositivo) fornisce una sintesi organica dei risultati ottenuti e ipotizza possibili scenari di intervento, simulandone gli effetti attesi grazie ai modelli realizzati.

3. QUADRO DOCUMENTALE E ATTIVITÀ DI MONITORAGGIO IN SITO

La prima fase, propedeutica alle successive ma soggetta ad integrazioni e modifiche in funzione di quanto progressivamente emerso nello sviluppo dello studio, ha riguardato la raccolta e sistematizzazione della grande mole di dati e informazioni disponibile dai numerosi studi pregressi condotti nell'area dei laghi costieri, con redazione di un quadro di sintesi documentale che costituisse una base di partenza per il nuovo studio, mettendo a frutto le attività già svolte da altri Autori.

È stata condotta una selezione della documentazione di maggiore attinenza e rilievo tra quanto fornito da diversi Enti (in particolare si ringraziano per la gentile disponibilità il PNC, il Corpo Forestale dello Stato, la Provincia di Latina, l'ARPA Lazio - sezione di Latina) e quanto reperito su web e da archivi propri.

Tali documenti sono stati codificati suddividendoli per tema prevalente, relativamente a quattro aree tematiche; per ciascuno di essi è stata quindi redatta una scheda monografica di sintesi in modo da consentire un rapido accesso alle informazioni di principale interesse, organizzata secondo campi standardizzati.

Sulla base del quadro documentale sono state anche redatte delle cartografie tematiche riassuntive di alcuni aspetti di interesse e si è proceduto ad un inquadramento dello stato ambientale e del sistema delle aree protette.

Tale documento contiene l'individuazione e descrizione dei parametri chimico-fisici che maggiormente condizionano e caratterizzano il ciclo biologico di un lago e i processi di eutrofizzazione (temperatura, ossigeno, salinità, nutrienti), unitamente ad un'analisi della loro distribuzione e entità nei corpi idrici in esame. In funzione dei dati disponibili è stata anche prodotta una caratterizzazione dei vari livelli trofici relativi all'area in studio.

Il sistema Lago di Fogliano - Lago di Monaci rientra nei confini del Parco Nazionale del Circeo, all'interno della Pianura Pontina. Anche se relativamente poco esteso, il PNC è caratterizzato da una notevole varietà di ambienti e di biocenosi e, di conseguenza, da una rilevante ricchezza in termini di entità floristiche e faunistiche.

L'area in studio è compresa in un Sito di Importanza Comunitaria (SIC) e una Zona di Protezione Speciale (ZPS). L'importanza dell'area risiede soprattutto nella diversità dell'avifauna svernante e migratrice e nella presenza di specie rare per il Lazio, che costituiscono importanti indicatori biologici ed ecologici. I due laghi sono infatti classificati come Zone Ramsar, cioè zone umide di notevole importanza per la conservazione degli ecosistemi acquatici e, in particolare, degli uccelli migratori, in applicazione della Convenzione di Ramsar.

Contestualmente all'indagine documentale si è proceduto con numerose attività di monitoraggio in sito, per la raccolta diretta delle informazioni necessarie per le rappresentazioni modellistiche.

È stato innanzitutto effettuato un rilievo topografico-batimetrico di entrambi i laghi, per definirne con accuratezza la geometria del fondale ed i volumi idrici.

Sono state installate 3 stazioni di monitoraggio e registrazione in continuo dei livelli idrici (nei due laghi e presso la Foce Nuova di Fogliano, lato mare) e una stazione meteorologica per la misura e registrazione della pioggia e della temperatura, così da disporre di un dettaglio locale dei principali fattori di bilancio idrologico.

È stata inoltre definita una rete di monitoraggio di 15 punti su corpi idrici superficiali e 16 su acque sotterranee, ciascuno dotato di caposaldo topografico, per il rilievo su base mensile (nel periodo febbraio-ottobre 2011) dei livelli idrici e di alcuni parametri fisico-chimici di interesse.



Figura 2 – Attività di monitoraggio e rilievo su acque superficiali e sotterranee.

A integrazione di questo monitoraggio di base sono state effettuate tre campagne di maggiore dettaglio, comprendenti una mappatura sui due laghi dei principali parametri indicatori di qualità dei corpi idrici, oltre all'analisi chimica in laboratorio di alcuni campioni di acqua sia dei laghi che dei corsi d'acqua di maggiore rilevanza (rio Martino, canale Cicerchia, canale Nocchia), e ad una caratterizzazione del sedimento di fondo dei laghi.

Sono state infine eseguite alcune misure dell'entità dei flussi d'acqua presso la foce di Fogliano, per quantificare gli interscambi lago-mare.

Tutte le attività di monitoraggio descritte hanno avuto come principale obiettivo la definizione delle condizioni al contorno e dei dati di input per i modelli numerici, o la raccolta di dati necessari per la calibrazione degli stessi.

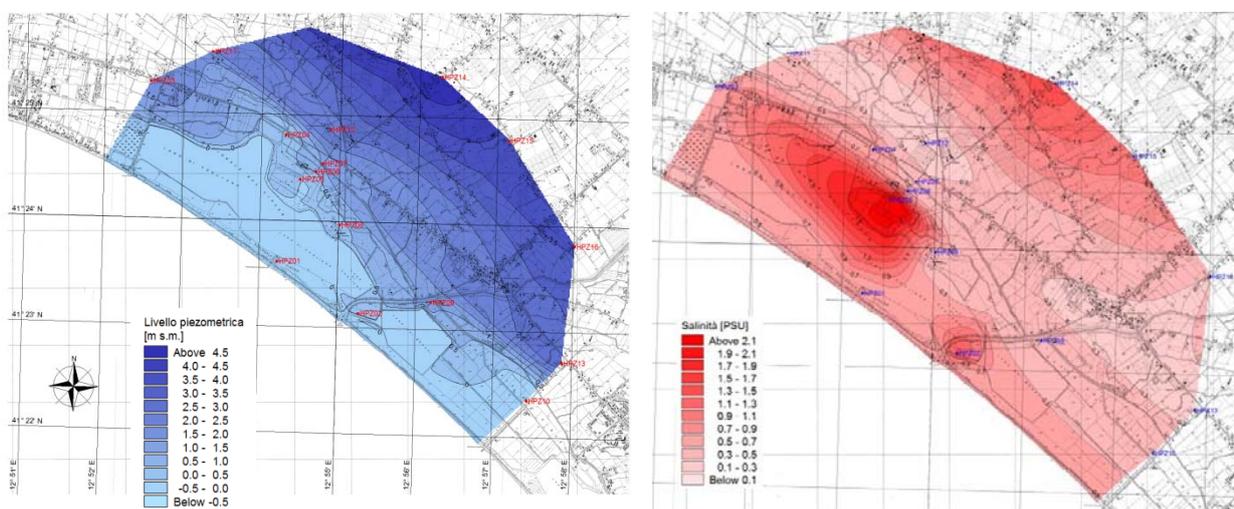


Figura 3 – Esempio di rappresentazione dell'andamento spaziale dei livelli di falda e della salinità delle acque sotterranee in occasione di una campagna di misura.

4. RAPPRESENTAZIONE DEL SISTEMA MEDIANTE MODELLI NUMERICI

L'analisi dei dati misurati, sia ottenuti attraverso la disponibilità di studi pregressi, sia attraverso campagne di monitoraggio specifiche, permette una definizione accurata dello stato attuale del sistema dei laghi di Fogliano e di Monaci, evidenziandone le problematiche. Queste ultime sono nel caso in esame riferibili all'eccessiva salinità dei laghi nei mesi estivi e alla loro tendenza all'eutrofizzazione, fenomeno -come già accennato- correlato all'eccessiva quantità di sostanze nutritive (prevalentemente azoto e fosforo) provenienti da fonti naturali o antropiche, che determinano un notevole accrescimento della biomassa nei laghi e la conseguente diminuzione dell'ossigeno disponibile, con effetti sull'aumento delle alghe tipo mucillagini, ed una generale riduzione della biodiversità (cfr. capitolo 5).

Le tipologie di dati misurati che permettono la caratterizzazione dello stato dell'ecosistema non fanno soltanto riferimento alle variabili più direttamente collegate alla qualità delle acque, come ad esempio le concentrazioni dei nutrienti nelle acque superficiali e della falda sotterranea, o le numerose altre variabili comunemente utilizzate per la caratterizzazione dello stato ambientale delle acque. I dati considerati comprendono infatti anche le componenti meteorologiche (vento, temperatura dell'aria, umidità, piogge, evaporazione), nonché le variabili "quantitative" che caratterizzano le acque superficiali (portate e livelli dei corsi d'acqua, livelli dei laghi, temperatura, salinità) e sotterranee (livelli della falda e flussi tra la falda, i laghi ed il mare).

Attraverso l'utilizzo di modelli numerici è possibile, a partire dalla disponibilità dei dati di cui sopra, estendere l'analisi sia nello spazio (le misure in sito fanno tipicamente riferimento ad alcuni punti specifici di campionamento, non all'intera area in studio) sia nel tempo, con possibilità di prevedere il comportamento del sistema mare-laghi-falda in relazione a differenti ipotesi di intervento sui laghi stessi (ivi compresa "l'opzione zero", ovvero assenza di interventi).

La possibilità di definire efficacemente ed accuratamente le *condizioni al contorno* e le *forzanti* dei modelli (ovvero tutti i fattori "esterni" che incidono sull'evoluzione del sistema), grazie alle attività di monitoraggio effettuate e alla maggiore disponibilità di dati presso le fonti esterne, ha condizionato la scelta del periodo di riferimento per le simulazioni condotte, ovvero l'anno compreso tra il 1 ottobre 2010 e il 30 settembre 2011.

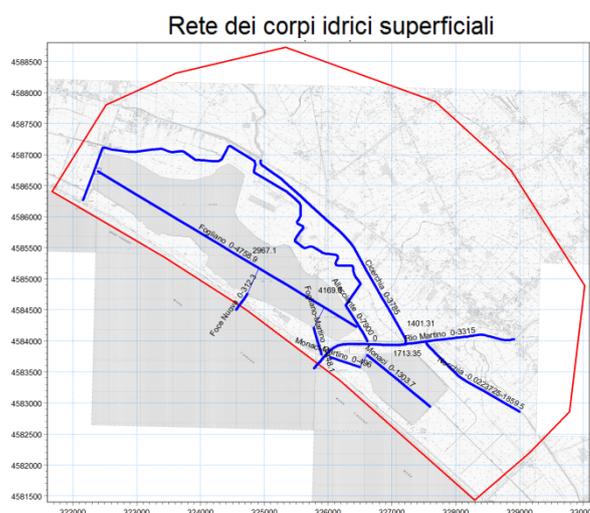
I dati raccolti hanno permesso di calibrare i modelli in modo da riprodurre le condizioni osservate in questo periodo; con riferimento allo stesso è stato poi possibile introdurre delle variazioni (proposte di intervento) e valutare gli effetti prodotti sull'ecosistema.

Più in dettaglio, lo studio ha comportato l'applicazione di modelli numerici in due distinte fasi del lavoro (3 e 4, secondo la suddivisione riportata nel capitolo 2).

Per quanto attiene la determinazione del bilancio quantitativo del ciclo dell'acqua (**bilancio idrologico**) per il sistema mare-laghi-falda-corsi d'acqua, sono state condotte le seguenti applicazioni.

1. Modello numerico finalizzato a simulare gli scambi idrici tra la falda e il *reticolo superficiale*, descritto come segue.

- Il *mare*: collegato tramite la foce Nuova (o foce del Duca) al lago di Fogliano, costituisce il principale elemento che garantisce il ricambio idrico all'interno di quest'ultimo. Quando è attivo il sistema di pompaggio, il mare garantisce l'instaurarsi di una circolazione interna anche nel lago dei Monaci. Attraverso gli scambi diretti (mare-laghi) e indiretti (tramite la falda) il mare è la fonte primaria di immissione salina all'interno del sistema dei laghi.
- I *laghi*: attualmente risultano scollegati dal reticolo idrografico superficiale e l'interscambio con i canali avviene tramite i flussi di falda. Il solo lago di Fogliano è collegato liberamente al mare.



- I *canali* attualmente non collegati direttamente ai laghi, interagiscono con essi attraverso la falda. In alcuni casi, in particolare nei loro tratti terminali, essi possiedono caratteristiche di salinità confrontabili con quelle marine, costituendo una ulteriore possibile fonte di immissione salina all'interno del sistema dei laghi.
2. Modello specifico per la simulazione dell'andamento dei livelli idrici nella falda (con riferimento anche alle oscillazioni stagionali connesse ai pompaggi per fini irrigui) e delle quantità di acqua che migrano dalla falda ai laghi e viceversa, per la cui predisposizione è stato necessario introdurre:
 - dati relativi alle caratteristiche del terreno e della falda sotterranea (spessore, permeabilità, quote del terreno in superficie);
 - dati relativi agli apporti di pioggia e all'infiltrazione reale della pioggia nel terreno
 - serie osservate in sito dell'andamento dei livelli su base mensile.
 3. Modello tridimensionale di dettaglio dei laghi di Fogliano e di Monaci, che sulla base degli apporti dalla falda calcolati precedentemente, degli scambi con il mare, nonché delle forzanti atmosferiche (vento, temperatura dell'aria, umidità, nuvolosità, precipitazioni-evaporazione) è in grado di restituire il livello dei laghi e l'andamento delle circolazioni di corrente al loro interno.
 Attraverso l'introduzione delle variabili atmosferiche sopra elencate, il modello può simulare gli scambi di calore tra i laghi e l'atmosfera, riproducendo pertanto il fenomeno dell'evaporazione e l'andamento della temperatura dei laghi.
 In funzione della pioggia, degli apporti idrici di acqua dolce (dai canali e dalla falda) e degli apporti di acqua salata con il mare, il modello è inoltre in grado di ricostruire l'andamento della salinità in ogni punto dei laghi nel corso dell'anno preso a riferimento.

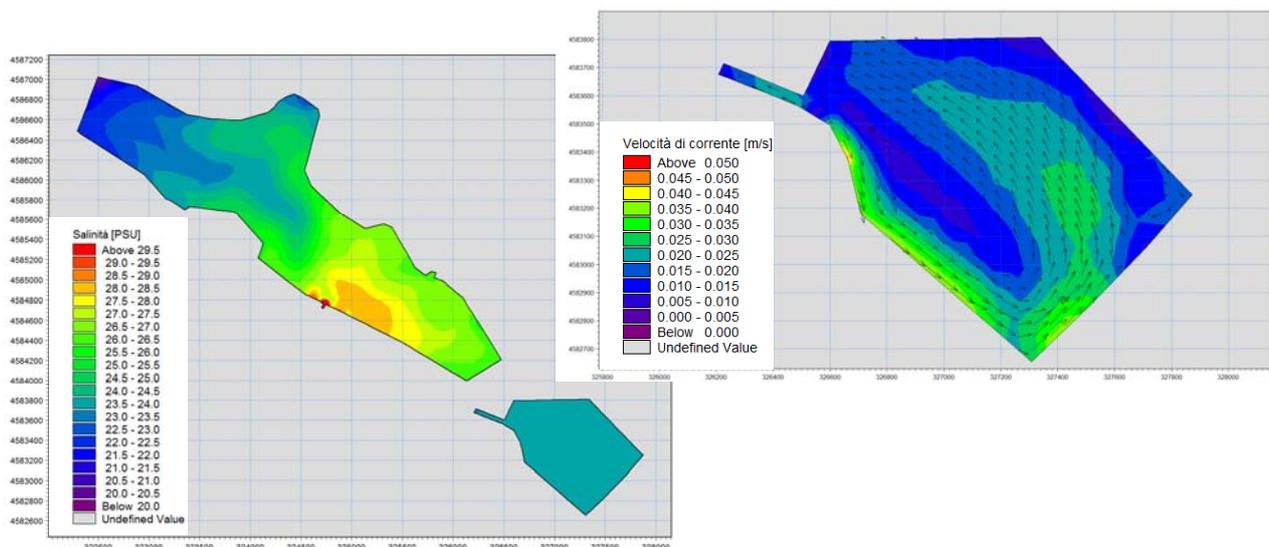


Figura 4 – Esempio di rappresentazione dell'andamento spaziale della salinità nelle acque dei laghi (a sinistra) e delle velocità di corrente in un dato istante (a destra).

Nella quarta fase dello studio, per descrivere l'assetto ecologico dei laghi è stato impiegato un modello tridimensionale, integrativo di quello utilizzato per la simulazione di livelli, correnti, salinità e temperatura, in grado di descrivere i processi fisici, chimici e biologici, tra i quali il ciclo dei nutrienti, la crescita di zooplancton e fitoplancton, la crescita algale ed il bilancio dell'ossigeno disponibile nei laghi.

Per ciascuna variabile ecologica simulata si è indagata la presenza di un andamento stagionale e la sua possibile correlazione con fattori esterni (forzanti climatiche/ambientali) o con alcune delle altre variabili in gioco. I risultati ottenuti sono inoltre stati posti a confronto con dati derivanti da studi pregressi, per individuare eventuali trend evolutivi del sistema.

Tutti i parametri simulati (fisici, chimici, ecologici) sono restituiti ad un passo temporale di un'ora per l'intero anno di riferimento, su ciascuna cella del modello. Per ottenere un quadro sintetico di riferimento sono state individuate quattro porzioni di ciascun lago ("macroaree") caratterizzate da un comportamento omogeneo, restituendo per ogni istante temporale un valore medio per macroarea delle grandezze di interesse.

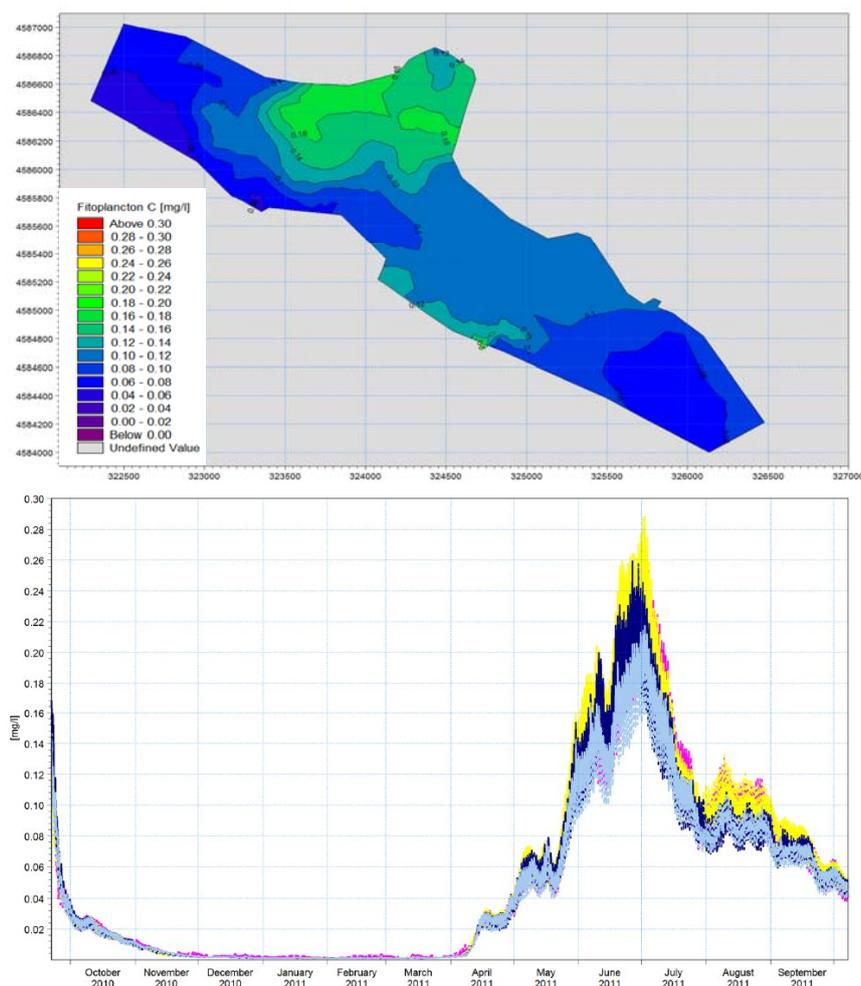


Figura 5 – Andamento spaziale e temporale del fitoplancton in Fogliano (sopra) e Monaci (sotto).

Ricostruito quindi l'andamento attuale nei laghi di Fogliano e di Monaci dei principali parametri fisici (livelli, temperatura, salinità) ed ecologici presi a riferimento, è stato possibile utilizzare i modelli numerici per la simulazione di alcuni possibili scenari di intervento.

Essi, meglio descritti nel capitolo 6, prevedono principalmente la reimmissione nei laghi di acque dolci provenienti dal reticolo superficiale dei canali (in presenza o meno di processi di fitodepurazione, funzionali alla riduzione del carico di nutrienti), l'utilizzo di sistemi meccanici (pompe) per indurre circolazioni interne di corrente ed un eventuale ripristino del collegamento un tempo esistente tra i due laghi, mediante riattivazione di un sifone al di sotto del rio Martino.

5. ANALISI DELL'ASSETTO ECOLOGICO

L'analisi della struttura del sistema ecologico complessivo lago di Fogliano - lago di Monaci è stata realizzata sulla base dei dati pregressi, delle indagini in sito e dei risultati dell'applicazione dei modelli. Lo studio ha portato ad ottenere un quadro conoscitivo complessivo dei laghi in termini di biodiversità, di livelli trofici e di flussi di energia e di materia, con specifica attenzione anche alle relazioni tra i livelli trofici superiori (fino alla fauna ittica e all'avifauna), utilizzato come scenario di partenza nell'analisi delle possibili ripercussioni sulle varie componenti dell'ecosistema in relazione ai vari scenari di intervento ipotizzati.

Per realizzare il quadro conoscitivo dello stato ambientale attuale del sistema, i dati bibliografici sono stati integrati e confrontati con i risultati dell'applicazione del modello, che ha prodotto una simulazione accurata, sul periodo di riferimento di un anno (ottobre 2010 - settembre 2011), della variazione spazio-temporale di temperatura, di salinità, della concentrazione dell'ossigeno disciolto e dei nutrienti (azoto e fosforo), nonché degli effetti indotti da questi parametri sulla crescita di componenti biologiche, quali fitoplancton, zooplancton e macrofite².

Il fenomeno dell'eutrofizzazione è infatti correlato con un anomalo sviluppo della vegetazione e del fitoplancton, dovuto ad eccessivi apporti di nutrienti. Il loro aumento numerico presso la superficie dello specchio d'acqua comporta una limitazione degli scambi gassosi (e quindi anche del passaggio in soluzione dell'ossigeno atmosferico nell'acqua) e dell'ingresso della luce solare (fonte di energia e motore della fotosintesi).

Inoltre, quando le alghe muoiono vi è una conseguente forte diminuzione di ossigeno a causa della loro decomposizione, ed i processi di putrefazione e fermentazione associati liberano quantità elevate di ammoniaca, metano e acido solfidrico, rendendo l'ambiente inospitale anche per altre forme di vita bentoniche (pesci di fondo, molluschi, crostacei, ecc.), con ricadute anche sui livelli superiori della catena alimentare.

² Macroalghe, muschi e piante che vivono perennemente sommerse.



Figura 6 – *Bloom* algale osservato nel lago di Monaci.

Di seguito si propone un quadro descrittivo semplificato dei vari parametri analizzati e modellizzati:

- *Livello idrico*: nel lago di Monaci presenta variazioni molto più significative che in Fogliano, a causa dell'isolamento rispetto al mare e delle regolazioni antropiche effettuate mediante il pompaggio con l'idrovora, che determinano un innalzamento tale da originare in alcuni periodi una dispersione in falda delle acque del lago.
- *Salinità*: l'apporto di acque dolci ai laghi è principalmente meteorico, a causa della deviazione dei corsi d'acqua e canali che in essi confluivano. Ciò ha contribuito all'aumento dei valori di salinità, che sono passati dalle originali condizioni di meso-alinità (20 g/l) a quelle attuali di polialinità-eualinità (> 30 g/l). Tuttavia, i valori registrati nell'ultimo quinquennio evidenziano un'attuale tendenza al decremento. Le simulazioni mostrano andamenti stagionali, con i valori più bassi nei mesi invernali e crescenti in estate, in relazione all'elevato tasso di evaporazione e alle minori precipitazioni.
- *Temperatura*: la temperatura in ambienti costieri poco profondi e confinati, come quelli in studio, è in genere estremamente variabile, poiché molto sensibile non solo alle variazioni stagionali ma anche al semplice mutare delle condizioni atmosferiche. A causa dello scarso volume, infatti, in entrambi i laghi l'acqua tende a raggiungere temperature estreme sia in estate (33-34°C) che in inverno (2°C), determinando un ampio gradiente stagionale. Tale comportamento è assai evidente in Monaci, mentre in Fogliano, grazie agli scambi continui con il mare, è limitato sia spazialmente che come entità.
- *Ossigeno*: da giugno a settembre i livelli di ossigeno nelle acque di Fogliano e Monaci si mantengono - come media sulle macroaree omogenee - su valori dell'ordine dei 6 mg/l, non elevati (nel periodo invernale l'ordine di grandezza è di 10 mg/l), ma comunque indice di un sufficiente livello di qualità ambientale (è possibile considerare indicativamente come condizione di rischio la diminuzione a meno di 4 mg/l)
- *Azoto inorganico*: le concentrazioni di questo nutriente risultano aumentate rispetto agli anni '90. La simulazione dell'andamento evidenzia concentrazioni più basse da febbraio a maggio e più alte da settembre a dicembre.

- *Fosforo inorganico*: a differenza dell'azoto, il fosforo è caratterizzato da un ciclo chiuso, e se non ci sono scambi esterni permane nei laghi conservando la sua massa. Tale caratteristica risulta utile per il calcolo dei flussi di massa e del metabolismo dell'ecosistema. Inoltre, poiché l'attività di fissazione dell'azoto da parte degli organismi non può essere inibita, l'unico modo per intervenire sul livello trofico di un ecosistema lagunare come quello in esame è di intervenire sui carichi di fosforo, che risulta il fattore limitante per lo sviluppo di biomassa (zooplancton e fitoplancton).

In entrambi i laghi i valori di concentrazione del fosforo totale restituiti dal modello non evidenziano particolari condizioni di stagionalità e si mantengono sempre al di sotto dei 0,02 mg/l, indicando una condizione di oligo-mesotrofia (ambiente relativamente povero di sostanze nutritive). Tendenzialmente le concentrazioni dei composti del fosforo risultano più alte da giugno ad ottobre, quando si possono verificare condizioni di anossia nei sedimenti, che rilasciano fosforo.

I rapporti atomici delle forme dei due nutrienti (fosforo e azoto) nelle concentrazioni simulate evidenziano una fosforolimitazione sino ai mesi di luglio/agosto, quando le concentrazioni di azoto diventano prossime allo zero, subentrando quindi una limitazione da quest'ultimo.

Con l'allestimento del modello risulta possibile simulare l'andamento dei vari parametri in funzione degli scenari progettuali, al fine di verificare gli effetti attesi e fornire uno strumento decisionale per la scelta degli interventi specifici da realizzare.

Lo studio si è inoltre concentrato sulla caratterizzazione dei diversi livelli trofici che caratterizzano il sistema dei due laghi, allo scopo di stimare le possibili ripercussioni su tutte le componenti biotiche che caratterizzano l'ecosistema. Se ne riporta di seguito una sintesi.

- **Produttori primari**: organismi in grado di produrre materia organica vivente partendo da ciò che è disponibile nell'ambiente (acqua, anidride carbonica, sali ed energia solare). La scarsa profondità dei due bacini lacustri fa sì che tutta la colonna d'acqua sia fotosinteticamente attiva. In un ecosistema lacustre come quello in esame è possibile distinguere due grandi tipologie di produttori primari in base alle dimensioni: fitoplancton e macrofite, distinguibili a loro volta in macroalghe e fanerogame.

Il *fitoplancton* rappresenta una componente fondamentale degli ecosistemi acquatici, in quanto alla base delle reti trofiche. L'andamento simulato di questo componente mostra una ovvia stagionalità, con un incremento delle concentrazioni da aprile a settembre. Mediamente, i valori stimati per il lago di Monaci risultano nettamente inferiori a quelli relativi a Fogliano.

Per quanto riguarda il popolamento a *macrofite*, con il termine fanerogame si intendono le vere e proprie piante, composte da organi con funzioni differenziate come radici, fusti, foglie, fiori, frutti e semi, perfettamente adattate alla vita acquatica. Le macroalghe, d'altro canto, sono organismi inferiori sulla scala evolutiva, mono e pluricellulari, ma non organizzati in tessuti veri e propri e quindi caratterizzati da un'unica struttura indifferenziata che svolge la stessa funzione, ad eccezione delle strutture riproduttive. Il popolamento a macrofite riveste un ruolo significativo come indicatore ambientale, ed in particolare la presenza di fanerogame è indice di elevata qualità, in quanto sostiene un'intrinseca biodiversità e funge da *nursery* per un gran numero di specie animali. La distribuzione della vegetazione acquatica all'interno del lago di Fogliano mostra la presenza di tre zone distinte: una porzione a Nord, tipicamente lagunare, con dominanza della fanerogama *Ruppia cirrhosa*, una porzione centrale soggetta più direttamente all'azione del mare, con la concomitante presenza di *Cymodocea nodosa*, ed infine una porzione a Sud influenzata dalla vicinanza del Rio Martino, dove è diffusa anche l'alga verde *Chaetomorpha sp.* e *Rytiphloea tinctoria*. Tale composizione testimonia la discreta qualità attuale dell'ecosistema ed una sua tendenza ad un ulteriore miglioramento. Relativamente al lago di Monaci, la superficie lacustre risulta quasi completamente

coperta dalla macroalga *Chaetomorpha linum*, che nelle stagioni più calde raggiunge crescite ed estensioni elevate, e dalla Fanerogama *Ruppia cirrhosa*. A causa della dominanza a macroalghe *Chlorophyceae*, il lago è classificato come ecosistema ad elevata trofia, ecologicamente instabile e con ridotta diversità biologica; tuttavia la contemporanea presenza della *Ruppia* è un segnale positivo, in quanto attesta la potenzialità ecologica dell'ecosistema ad orientarsi verso una condizione di maggiore stabilità.

- Discorso a sé stante, nell'ambito delle macrofite, merita il **canneto**, soprattutto per la funzione che svolge all'interno dell'ecosistema lacustre. Nell'area in studio i canneti sono rappresentati dalle comunità a *Phragmites australis* e da quelle a *Scirpus maritimus*. Si tratta in entrambi i casi di formazioni che si insediano ai margini dei laghi ed in zone lungamente inondate. Il fragmiteto, presente lungo la sponda Sud-Ovest del lago di Fogliano, forma una zona umida estremamente importante per lo sviluppo e il sostentamento di numerose specie vegetali ed animali, potendo essere considerata a pieno titolo un vero e proprio ecosistema e rivestendo anche un'importante zona di transizione tra due ecosistemi, quello terrestre e quello lacustre. Il canneto, in quanto costituito da organismi vegetali, svolge innanzitutto una funzione di produzione primaria, offre habitat idonei alla deposizione delle uova e allo svolgimento di vera e propria *nursery* per il novellame di alcune specie ittiche e anfibiae, e alla nidificazione di numerosi uccelli acquatici. La fascia del canneto ha inoltre un ruolo importante per la prevenzione e riduzione dell'erosione naturale delle sponde lacustri, grazie alla stabilizzazione dovuta alle radici e alla dissipazione dell'energia legata al moto ondoso e alla corrente. Essa può, infine, influenzare la qualità delle acque, svolgendo una naturale attività di filtrazione per i nutrienti e gli altri potenziali inquinanti contenuti nelle acque di dilavamento che afferiscono dal bacino imbrifero al lago, o di assorbimento dei nutrienti direttamente dalle acque e dai sedimenti lacustri.
- **Zooplankton**: rappresenta il complesso degli organismi animali che vivono in sospensione nelle acque e che non sono capaci di vincere i moti del mare con movimenti propri. A livello trofico lo zooplankton svolge un ruolo fondamentale perché rappresenta l'anello di congiunzione tra fitoplankton e consumatori superiori. Da un lavoro condotto nel biennio 1992-1993, risulta che lo zooplankton nel lago di Fogliano presenta i valori più alti di densità e di variabilità nell'area prospiciente la Foce del Duca, in particolare in aree dove il ricambio d'acqua è maggiore. La variabilità sembra quindi dipendere non solo dalla produzione autoctona ma anche dai fattori idrodinamici dovuti all'ingresso dell'acqua marina. Relativamente al lago di Monaci, dati risalenti agli anni '80 evidenziano invece una costante povertà qualitativa e quantitativa del popolamento zooplanktonico, con diverse specie salmastre. Nel cercare di spiegare le dinamiche fitoplankton-zooplankton, si tenga presente che buona parte del materiale organico derivante dalla produzione primaria algale non entra nella catena alimentare in quanto le Cianofite sono scarsamente utilizzabili dallo zooplankton erbivoro, per via della loro morfologia quasi sempre filamentosa o coloniale. Per tale motivo una crescita abnorme di fitoplankton a seguito di fenomeni di eutrofizzazione non è necessariamente seguita da una altrettanto consistente crescita di zooplankton. Gli effetti dell'eutrofizzazione sullo zooplankton sono mediati attraverso gli effetti sull'abbondanza delle alghe di piccole dimensioni che costituiscono l'alimento principale dello zooplankton fitofago. Nei due laghi, si può notare che ad ogni incremento della concentrazione fitoplanktonica segue un incremento della concentrazione zooplanktonica, di proporzioni tuttavia inferiori.
- **Zoobenthos**: i popolamenti zoobentonici (ovvero specie animali che popolano il fondale) dei laghi Pontini si presentano piuttosto ricchi e complessi. I policheti e i molluschi costituiscono i gruppi dominanti sia per numero di specie che per abbondanza.
- **Pesci**: la maggior parte delle specie ittiche che popolano i due laghi sono marine eurialine (in grado cioè di sopportare ampie variazioni della salinità) che utilizzano la laguna come *nursery*. L'aumento della salinità

registrato negli ultimi decenni è infatti il principale fattore che ha determinato le condizioni ambientali idonee alla presenza di una diversificata comunità ittica di origine marina.

La comunità ittica del Lago di Fogliano risulta costituita da sei specie residenti di cui almeno due (nono e latterino) presenti con un elevato numero di individui (pur non rappresentando una biomassa particolarmente elevata viste le ridotte taglie), accompagnate da un alto numero di specie marine occasionali e da un'unica specie migratrice catadroma (anguilla). Rispetto a Fogliano, il lago di Monaci risulta più povero in specie: la mancanza di una comunicazione diretta con il mare ha portato ad un graduale impoverimento nella laguna di alcune popolazioni ittiche marine eurialine.

- **Uccelli acquatici:** l'ecosistema dei laghi costieri in esame è frequentato da un elevato numero di uccelli acquatici, con straordinari valori di presenze sia in termini qualitativi che quantitativi, con finalità sia trofiche che riproduttive. La comunità di uccelli acquatici svernanti e migratori è la componente più importante quanto a biomassa e a numero di specie. L'importanza del parco come area di svernamento e sosta durante le migrazioni è comprovata da osservazioni anche recenti di specie oramai estinte nel resto d'Europa, come il chiurlottello. I laghi costituiscono un'area di importanza nazionale anche per Rallidi come la folaga (*Fulica atra*), per la quale interventi di rinaturalizzazione delle rive e della vegetazione ripariale sono prioritari. Nelle aree umide del parco sono segnalate oltre 40 specie di limicoli. Il vasto gruppo degli uccelli acquatici (39 specie tra *Gaviformi*, *Podicepediformi*, *Anseriformi*) costituisce la componente ornitica più interessante del parco, soprattutto dal punto di vista di biomassa durante l'inverno e i periodi migratori.

Considerando, infine, un livello superiore di indagine, ovvero quello ecosistemico, lo studio ha indagato le due **funzioni principali di un ecosistema: il Metabolismo Netto dell'Ecosistema (NEM) e il metabolismo dell'azoto [nfix-denit].**

Il NEM rappresenta la differenza (p-r) tra i processi di PRODUZIONE (produzione di materia organica e di ossigeno) e quelli di RESPIRAZIONE (consumo di materia organica e di ossigeno): se prevalgono i processi di produzione il sistema è definibile come "autotrofico" mentre se prevalgono i processi di respirazione è definito "eterotrofico".

La funzione dell'ecosistema legata al metabolismo dell'azoto [nfix-denit] indica invece l'insieme di quei processi (soprattutto microbici) che portano alla maggior o minor presenza di azoto inorganico disciolto nella colonna d'acqua.

I risultati di questi calcoli hanno evidenziato che entrambi i laghi possono essere classificati come ecosistemi "in balance", con un metabolismo estremamente basso. Il lago di Monaci mostra un metabolismo superiore rispetto a Fogliano, evidenziando una maggiore tendenza all'eterotrofia e quindi una produzione di fosforo maggiore; in altre parole Monaci consuma, ovvero respira, di più di Fogliano. Entrambi i laghi, inoltre, mostrano tassi di respirazione bentonica (cioè a livello del fondo) ridotti e una leggera prevalenza dei processi di dissimilazione dei composti dell'azoto.

6. SINTESI DEI PRINCIPALI RISULTATI

6.1 Bilancio idrologico

Il bilancio idrologico dei laghi è costituito dalla somma algebrica di tutti i flussi idrici in ingresso e uscita dal sistema, con riferimento particolare alle seguenti variabili principali, caratterizzate da una mutua influenza:

- A: afflusso meteorico;
- E: flusso di evaporazione;
- F: flussi di interscambio con la falda;
- S: scambi con corpi idrici superficiali (lago-mare).

Per quanto riguarda il lago di Fogliano, il cui comportamento nell'anno di riferimento è da ritenersi "naturale" in quanto non direttamente influenzato da azioni antropiche, il bilancio idrologico risulta in sostanziale pareggio: il sistema infatti si "regola" automaticamente in ragione del collegamento diretto con il mare, attraverso il quale si bilanciano le differenze (in positivo o negativo) delle altre componenti.

Per quanto riguarda Monaci invece il bilancio risente pesantemente delle regolazioni effettuate (pur esplicitandosi in apporti netti relativamente modesti, i volumi che circolano nel lago per effetto degli scambi con la falda e con il mare sono molto rilevanti, circa 5 volte quelli meteorici), ed è sbilanciato verso i volumi in ingresso in quanto a fine settembre 2011, in ragione delle scarse precipitazioni, i livelli sono stati ancora mantenuti artificialmente elevati mediante il pompaggio dall'idrovora che immette nel lago acqua di provenienza marina.

Gli interscambi laghi-falda risultano significativi, e in linea generale sempre in direzione dell'alimentazione dei laghi. I valori di flusso risentono significativamente dell'abbassamento di falda riscontrato ai confini dell'area di studio correlato con l'avvio degli attingimenti da pozzo a finalità irrigua nella stagione tardo primaverile - estiva.

Nel lago di Monaci il mantenimento artificiale di livelli significativamente maggiori di quelli di Fogliano (e di quelli della falda circostante) porta nel periodo estivo ad un'inversione del segno degli scambi con il corpo idrico sotterraneo, con una dispersione in falda delle acque del lago. Questo risultato derivato dal modello è congruente con le osservazioni effettuate in sito, dalle quali si era desunta un'immissione delle acque molto salate del lago entro il tratto terminale del canale Nocchia (la medesima osservazione si riscontra anche in studi pregressi).

Per entrambi i laghi il bilancio globale riferito all'anno medio è positivo, per cui complessivamente si risconterà un flusso netto in uscita dai laghi verso il mare, pari a circa 3,59 Mm³ per Fogliano e 0,45 Mm³ per Monaci.

Su scala mensile il bilancio risulta positivo indicativamente da settembre a maggio, mentre nei mesi estivi si verifica un deficit, a causa principalmente dell'evaporazione più intensa e delle minori precipitazioni.

In questi mesi prevarranno pertanto i flussi di acqua marina in ingresso entro il lago di Fogliano. Per quanto riguarda Monaci, nonostante i volumi di deficit siano globalmente minori, l'incidenza sul minore volume idrico è molto più rilevante (oltre il doppio in termini specifici), principalmente a causa della dispersione in falda provocata dal mantenimento dei livelli elevati.

Risulta quindi necessario compensare con pompaggio di acqua marina queste perdite rilevanti, per evitare un eccessivo stress dell'ecosistema (anche in termini di temperatura e ossigenazione delle acque), provocando tuttavia un marcato incremento della salinità rispetto alle condizioni salmastre osservate nel corso degli altri mesi.

Il mantenimento nei mesi estivi di un livello meno elevato nel lago (ma pur sempre compatibile con lo scarico a mare in condizioni di bassa marea) produrrebbe probabilmente una riduzione delle dispersioni, e di conseguenza la necessità di minori durate di funzionamento del pompaggio (comunque necessario), con risparmio energetico e minore apporto di acqua salata.

6.2 Scenari di intervento

Ricostruito, con l'ausilio degli strumenti modellistici descritti nel capitolo precedente, l'andamento attuale nei laghi di Fogliano e di Monaci dei principali parametri fisici (livelli, temperatura, salinità) ed ecologici presi a riferimento (ossigeno disciolto, azoto e fosforo inorganici, fosforo totale, fitoplancton, zooplancton, vegetazione bentica), si è proceduto alla simulazione di alcuni possibili scenari di intervento, descritti nel seguito e riassunti in Tabella 1.

	Lago di Fogliano	Lago di Monaci
scenario 1	Fitodepurazione "piccola", immissione presso Villa Fogliano (15 l/s costanti tutto l'anno).	Fitodepurazione "piccola", immissione da vertice Est di 20 l/s costanti tutto l'anno, da canale Nocchia.
scenario 2	Fitodepurazione "grande" presso l'area "canneti e prati umidi Cicerchia" (50 l/s tutto l'anno).	Fitodepurazione "grande", immissione da vertice Est di 50 l/s tra aprile e ottobre.
scenario 3	Collegamento tra i due laghi mediante il sifone esistente sotto il rio Martino.	Collegamento tra i due laghi mediante il sifone esistente sotto il rio Martino.
scenario 4	Accensione idrovore esistenti per pompaggio diretto dal canale Mastropietro nei mesi giu-set (200 l/s x 2). La simulazione è stata estesa a 2 anni consecutivi.	Come scenario 2, ma con maggiori concentrazioni di fosforo inorganico in ingresso. La simulazione è stata estesa a 2 anni consecutivi.

Tabella 1 – Descrizione sintetica degli scenari di intervento simulati.

6.2.1 Lago di Fogliano

Il *primo scenario* di intervento considerato prevede l'introduzione nel lago di Fogliano di una portata di acqua dolce limitata (15 l/s), assunta costante per tutto l'anno e derivante dalla fitodepurazione di un'area nei pressi di Villa Fogliano.

Il *secondo scenario* di intervento considerato prevede l'introduzione nel lago di Fogliano di una portata più rilevante (50 l/s) assunta anche in questo caso costante per tutto l'anno e derivante dalla fitodepurazione di un'area posta più a Ovest, identificabile come "canneti e prati umidi Cicerchia"

Il *terzo scenario* simulato prevede l'attivazione del collegamento tra i laghi di Fogliano e di Monaci attraverso una condotta esistente che sottopassa in sifone il Rio Martino. Lo scenario non prevede alcun'altra variazione rispetto allo stato attuale, mantenendo il pompaggio mediante l'idrovora nel lago di Monaci per creare una circolazione interna; si considera però di mantenere sempre completamente chiuse le paratoie di foce, per cui l'uscita di portata dal lago avviene solo attraverso la tubazione verso Fogliano. Grazie al collegamento diretto di quest'ultimo con il mare, si prevede in questo modo di ottenere un migliore equilibrio dei livelli idrici, una maggiore circolazione nell'area più orientale di Fogliano, interessata allo stato attuale da basse velocità, e una minore concentrazione di carico trofico in Monaci.

Nel *quarto scenario* considerato si è assunta un'immissione di portata, non derivante da fitodepurazione, attraverso l'impiego delle due idrovore esistenti, ma non utilizzate, ubicate all'estremità nord-occidentale del lago di Fogliano. L'immissione di portata è stata considerata pari a 200 l/s per ciascuno dei due punti di immissione (ai due vertici del lago), limitata temporalmente al periodo estivo (1 giugno – 30 settembre), in analogia con quanto effettuato nel lago di Monaci.

Il pompaggio, ipotizzato attivo per 8 ore al giorno, comporta una significativa immissione di nutrienti, con concentrazioni notevolmente superiori a quelle ipotizzate negli scenari che considerano l'immissione di portata fitodepurata, stimati a seguito dell'analisi dei risultati delle campagne di monitoraggio delle acque superficiali e dell'esame dei monitoraggi pregressi effettuati dalla Provincia di Latina.

Lo scenario è strutturato in modo da risultare particolarmente impattante sull'ecosistema del lago, in ragione delle significative portate immesse (peraltro forse non sempre disponibili dal sistema dei canali) e dell'utilizzo non trattato delle acque dal reticolo superficiale, che continua a mostrare rilevanti segni di inquinamento, per quanto di minore entità rispetto al passato.

L'obiettivo dell'analisi è la valutazione, a fronte di un probabile miglioramento delle caratteristiche chimico-fisiche, dell'effetto prodotto sul sistema trofico, ed in particolare se la presenza di un collegamento diretto con il mare sia sufficiente ad evitare l'innescò di fenomeni di eutrofizzazione. La simulazione combinata idrodinamica-ecologica è stata pertanto estesa ad un periodo temporale maggiore (due anni), al fine di indagare eventuali effetti cumulativi (o irreversibili) dell'introduzione del carico di nutrienti su un orizzonte temporale esteso ad almeno due cicli stagionali consecutivi.

6.2.2 Lago di Monaci

Il *primo scenario* di intervento prevede l'immissione nel lago dei Monaci di una portata proveniente da processo di fitodepurazione delle acque del canale Nocchia pari a 20 l/s, costanti durante l'anno.

Il *secondo scenario* di intervento per il lago dei Monaci prevede un'analogia immissione di portata proveniente da processo di fitodepurazione delle acque del canale Nocchia, di entità maggiore (pari a 50 l/s) ma limitata al solo periodo compreso tra aprile e ottobre. Il punto di immissione è il medesimo.

Congruentemente con quanto già illustrato per il lago di Fogliano, il *terzo scenario* simulato prevede l'attivazione del collegamento tra i laghi di Fogliano e dei Monaci attraverso la condotta che sottopassa il Rio Martino.

Nel *quarto scenario* considerato, a seguito dell'esame dei risultati di quelli precedenti, si è deciso di replicare il medesimo assetto dello scenario 2, ma con un incremento significativo della concentrazione di fosforo totale in ingresso. La simulazione combinata idrodinamica-ecologica è stata estesa ad un periodo di due anni al fine di valutare eventuali deviazioni dall'assetto attuale su un orizzonte temporale esteso ad almeno due cicli stagionali consecutivi.

6.2.3 Sintesi dei risultati ottenuti

In sintesi, per quanto riguarda il lago di **Fogliano**, si può riassumere quanto segue.

- Lo scenario 1 determina un lieve decremento della salinità media, **effetti limitati** sulle concentrazioni di nutrienti, sullo stato trofico e quindi sulla produttività primaria dell'ecosistema (ridotto incremento della biomassa fitoplanctonica). I carichi di azoto e di fosforo risultano molto contenuti e il sistema permane in uno stato di fosforo-limitazione.
- Lo scenario 2 determina un significativo decremento della salinità media, un significativo consumo di azoto e un lieve accumulo di fosforo. Gli **effetti** sulla produttività primaria risultano **significativi**, con un incremento della biomassa fitoplanctonica e della vegetazione bentonica. Anche lo stato trofico, infatti, subisce un lieve incremento. Rispetto allo scenario 1, i carichi di azoto e di fosforo risultano circa 6 volte superiori.
- Lo scenario 3 determina **effetti pressoché nulli** sull'ecosistema in analisi, non determinando alcun incremento di produttività, né bloom algali né aumenti del livello trofico. Il sistema non subisce alcuna variazione di salinità.
- Lo scenario 4 determina **effetti molto significativi** sull'ecosistema lacustre, concentrati nel periodo estivo. Lo scenario determina un netto decremento della salinità media e un notevole incremento della produttività primaria, con bloom algale e aumento della vegetazione bentonica. Anche lo stato trofico, infatti, subisce un lieve incremento. Lo scenario 4 implica carichi di azoto e di fosforo annuali nettamente superiori rispetto agli altri scenari (e tra l'altro concentrati solo nel periodo estivo).
- Il 2° anno di simulazione dello scenario 4 rivela un ulteriore incremento della produttività primaria e quindi della biomassa dei produttori, a seguito dell'elevato accumulo di nutrienti. Nonostante i calcoli delle funzioni metaboliche del sistema mostrino un aumento del metabolismo del fosforo e dell'azoto volto a consumare questo eccesso di nutrienti, con conseguente incremento della produzione (bloom algale), il sistema non riesce a ritornare alle condizioni di partenza, nonostante si riscontri un leggero miglioramento rispetto al 1° anno di simulazione.

Allo stato attuale delle conoscenze dunque l'effetto perturbativo indotto nello scenario 4 appare permanente, con tendenza incrementale, anche nel 2° anno di simulazione (l'incremento nello sviluppo di biomassa per consumare i nutrienti immessi è maggiore nel secondo anno rispetto al primo). L'aumento dell'entità dei bloom algali determinerebbe nel corso del tempo ulteriori effetti negativi sull'ecosistema, a causa dell'eccessivo accumulo di materia organica che dovrà essere smaltita dall'ecosistema stesso.

- Considerando le concentrazioni del fosforo totale simulate per i 4 scenari, si può affermare che i livelli trofici del Fogliano non subiscono variazioni significative, permanendo in **condizioni di oligo-mesotrofia**. Tuttavia, si sottolinea che l'incremento del carico afferente di nutrienti relativo agli scenari 1, 2 ed (in particolar modo) 4 determina un significativo aumento della biomassa fitoplanctonica.

Per quanto riguarda invece il lago di **Monaci** vale quanto segue.

- Lo scenario 1 determina un significativo decremento della salinità media, oltre a **effetti discreti** sulle concentrazioni di nutrienti, sullo stato trofico e quindi sulla produttività primaria dell'ecosistema (discreto incremento della biomassa fitoplanctonica). I carichi di azoto e di fosforo risultano significativi, anche se più bassi rispetto agli altri scenari (2 e 4).
- Lo scenario 2 determina un significativo decremento della salinità media ed **effetti discreti** sulla produttività primaria, con un incremento della biomassa fitoplanctonica. La vegetazione bentonica, che nel Monaci è meno sviluppata rispetto a Fogliano, aumenta solo leggermente. Anche lo stato trofico subisce un lieve incremento. Rispetto allo scenario 1, il carico annuale di azoto risulta superiore, mentre quello di fosforo solo leggermente inferiore.
- Lo scenario 3 determina **effetti pressoché nulli** sull'ecosistema in analisi, non determinando alcun incremento di produttività, né bloom algali né aumenti del livello trofico. Il sistema non subisce significative variazioni di salinità, ma una netta riduzione dei livelli a causa della regolazione marina.
- Lo scenario 4 determina **effetti molto significativi** sull'ecosistema lacustre, concentrati nel periodo estivo. Si osserva un netto decremento della salinità media, nonché significativi consumi di azoto ed accumuli di fosforo. Lo scenario implica un notevole incremento della produttività primaria, con bloom algale ed aumento della vegetazione bentonica. Anche lo stato trofico infatti subisce un lieve incremento.
- Il 2° anno di simulazione dello scenario 4 rivela un ulteriore ma leggero incremento della produttività primaria e quindi della biomassa dei produttori, a seguito dell'accumulo di nutrienti. I valori a fine anno appaiono però sostanzialmente equivalenti a quelli del precedente, non presentando pertanto un'evidente tendenza incrementale all'eutrofia. I calcoli delle funzioni metaboliche del sistema rivelano un aumento del metabolismo del fosforo e dell'azoto volto a consumare l'eccesso di nutrienti, con conseguente incremento della produzione (bloom algale), il quale potrebbe comunque determinare ulteriori effetti negativi sull'ecosistema, a causa dell'accumulo di materia organica che dovrà essere smaltita.
- Nel lago di Monaci lo scenario 4 implica un carico di azoto pari a quello dello scenario 2, ma un carico annuale di fosforo nettamente superiore rispetto agli altri scenari. Il netto incremento subito dalla biomassa dei produttori a seguito dell'aumentato apporto di questo nutriente evidenzia la **limitazione da fosforo** che caratterizza il bacino.
- Considerando le concentrazioni del fosforo totale simulate per i 4 scenari, si può affermare che i livelli trofici del Monaci non subiscono variazioni significative, permanendo in **condizioni di oligo-mesotrofia**. Tuttavia, si sottolinea che l'incremento del carico afferente di nutrienti relativo agli scenari 1, 2 ed in particolar modo al 4 determina un significativo aumento della biomassa fitoplanctonica.

Relativamente agli effetti che esercitano i vari scenari sul metabolismo degli ecosistemi lacustri indagati, lo scenario 3 è quello che determina i **minori cambiamenti nelle funzioni ecosistemiche** di entrambi i laghi,

che possono essere pertanto considerati trascurabili, ad eccezione di un leggero aumento dei processi dissimilativi a discapito di quelli riduttivi nel metabolismo dell'azoto del lago di Fogliano.

Lo scenario 4 è risultato invece essere **il più impattante**, poiché aumenta l'eterotrofia di entrambi i sistemi lacustri, in particolar modo di quello di Fogliano, invertendo la tendenza originaria. In tale scenario, quindi, la respirazione di sostanza organica prevale sulla produzione in entrambi i laghi, con conseguente rilascio netto di fosforo. Gli effetti sul metabolismo globale paiono diminuire di entità nel 2° anno di simulazione, dove si evidenzia come il sistema cerchi di ritornare verso le condizioni originarie, aumentando la produzione e consumando il fosforo accumulato in entrambi i laghi.

In tutti e 4 gli scenari comunque entrambi gli ecosistemi conservano la loro condizione di **"balance"** che li caratterizza nello stato attuale e il loro **metabolismo netto** continua ad essere classificabile come **basso**.

Relativamente ai **livelli trofici superiori**, il fattore ecologico che maggiormente condiziona il popolamento ittico delle acque di transizione, contigue con il mare, è rappresentato dalla variabilità della concentrazione salina. Questi ambienti, infatti, sono naturalmente soggetti ad ampie oscillazioni di salinità, in relazione a eventi come l'apporto di acque dolci, il flusso delle maree, l'evaporazione, le precipitazioni.

Gran parte dei **pesci** risultano di norma capaci di sopportare variazioni di salinità alquanto limitate (specie stenoaline), ma le specie che normalmente occupano gli ambienti di transizione sono in grado di sopportare un tenore di sali disciolti ampiamente fluttuante e per questo sono definite eurialine e anfibiotiche, ovvero capaci di vivere in ambienti sia di acque dolci che marine.

In sintesi, le acque del lago di Fogliano si mantengono entro range di salinità polialini tra novembre e maggio, diventando eurialine tra giugno ed ottobre; le acque del lago di Monaci si mantengono entro range di salinità polialini tra novembre e febbraio, scendendo a valori mesoalini tra marzo e maggio per poi crescere nuovamente e diventare eurialine tra luglio ed ottobre. In linea generale, quindi, i valori minori di salinità, tendenti verso le acque dolci, si riscontrano tra febbraio e maggio.

Queste variazioni di salinità non fanno tuttavia presupporre significative modificazioni nella composizione delle comunità ittiche dei due ecosistemi lacustri. Di fatto, il popolamento ittico è composto in gran parte da specie spiccatamente eurialine, e quindi in grado di sopportare ampie oscillazioni di salinità. Si può pertanto ragionevolmente asserire che gli scenari considerati non comportino variazioni significative nella composizione qualitativa dell'ittiofauna dei laghi, già caratterizzata da specie in grado di sopportare salinità fluttuanti; si rileva però la possibilità di un incremento quantitativo del popolamento ittico a seguito dell'incremento di zooplancton, che richiamerebbe una quantità di novellame maggiore, essendo la componente planctonica la base della dieta dei primi stadi di sviluppo delle specie ittiche.

Gli **uccelli** rappresentano una componente biotica in grado di adattarsi ad una grande varietà di habitat e condizioni ecologiche, grazie alla loro elevata plasticità fisiologica e comportamentale.

Da una ricerca effettuata presso le saline di Tarquinia sono emerse alcune possibili correlazioni tra la presenza di specifiche *guilds* di uccelli e alcuni parametri ambientali e biotici. Sulla base di questi risultati è stato possibile formulare alcune ipotesi in merito agli effetti degli scenari sull'ornitofauna.

In sintesi, considerando le variazioni indotte a livello ecosistemico, non si ravvisa la possibilità di drastiche variazioni nella composizione del popolamento ornitico che caratterizza il sistema lago di Fogliano - lago di Monaci; si prevede comunque che una moderata riduzione della salinità e l'aumento del livello trofico, con aumento delle specie foraggio, possa tradursi in un incremento di biodiversità.

6.3 Considerazioni conclusive

Come già detto in precedenza, la situazione attuale dei laghi di Fogliano e Monaci dal punto di vista qualitativo appare significativamente migliore rispetto agli anni passati, con particolare riferimento agli anni '90, in cui risultava ancora evidente l'effetto residuo del periodo in cui i laghi non erano isolati dal reticolo idrico superficiale. I campionamenti dei nutrienti effettuati nel lago in tale periodo risultavano infatti in tenori superiori di un ordine di grandezza rispetto agli attuali, analoghi a quelli misurati ancora oggi nel reticolo superficiale dei canali.

A seguito delle attività di gestione attuate dal PNC e dal Corpo Forestale (apertura dei collegamenti a mare, azionamento delle idrovore, sfalci, controllo dell'uso del suolo nel territorio circostante), si è giunti progressivamente ad una situazione ambientale relativamente buona, ed in tendenza al miglioramento, come anche suggerito da alcuni studi, per quanto l'ecosistema di Monaci risulti maggiormente instabile, a causa prevalentemente delle piccole dimensioni e dell'isolamento idraulico.

Dai risultati dei campionamenti pregressi e dei monitoraggi effettuati, oltre che delle simulazioni condotte, anche in presenza condizioni idrologiche particolarmente severe (estati calde e scarsissime piogge, come avvenuto nell'anno di riferimento) i sistemi non appaiono raggiungere condizioni critiche di anossia, negli ultimi anni probabilmente verificatesi (in Monaci) solo a causa di eventi accidentali di sversamento di inquinanti dal rio Martino.

Entrambi i laghi risultano caratterizzati da una limitazione da fosforo della biomassa dei produttori primari, per cui la regolazione di tale nutriente appare di elevata importanza per la regolazione del livello trofico.

Un elemento di relativa criticità è costituito da tenori di salinità che, a causa degli scambi con il mare e della limitazione degli apporti di acqua ai soli afflussi meteorici e di falda, giungono, prevalentemente nei mesi estivi, a raggiungere o superare i valori marini, tendendo a ridurre la biodiversità tipica di un sistema costiero ad acque salmastre.

Lo **scenario 3**, comune ai due laghi, è la proposta di intervento meno impattante, in quanto non prevede l'immissione di nutrienti all'interno del sistema ma si limita a collegare i due corpi idrici, sfruttando una tubazione esistente. Esso risulta pertanto anche l'intervento di più semplice realizzazione.

Non prevedendo l'introduzione di una portata di acqua non salata, l'intervento non produce significative variazioni nei parametri chimico-fisici, portando solo ad una maggiore uniformità delle caratteristiche tra i due corpi idrici (in termini prevalentemente di salinità, che tende a diminuire leggermente in Fogliano nei mesi primaverili).

L'effetto per cui lo scenario risulta significativo è però quello di mettere in comunicazione continua il lago di Monaci ed il mare, senza necessità di apertura delle paratoie di foce, garantendo pertanto da possibili ingressioni delle acque inquinate del Rio Martino.

Tale collegamento produrrebbe una regolazione automatica dei livelli, evitando di per sé l'eccessivo abbassamento (a causa dell'evaporazione) nel periodo estivo e scaricando il lago in presenza di livelli più elevati a seguito di precipitazioni autunnali-invernali (ferma restando la possibile necessità di apertura delle paratoie di foce in caso di eventi particolarmente intensi).

La sola apertura del collegamento non appare però sufficiente, in quanto le velocità di ingressione non sono tali da garantire una sufficiente ossigenazione delle acque, e la posizione e caratteristiche dimensionali del lago provocherebbero probabilmente elevati aumenti di salinità. Si prevede pertanto di mantenere il funzionamento dell'idrovora, finalizzato prevalentemente a creare una circolazione interna, con uscita delle acque nel lago di Fogliano e sbocco a mare.

La presenza del collegamento renderebbe però non necessario il mantenimento di livelli molto elevati nel lago, riducendo sensibilmente il numero di ore di funzionamento, e soprattutto evitando la dispersione in falda delle acque salate o salmastre, ottenendo peraltro un'ulteriore riduzione della necessità di pompaggio.

Dal punto di vista dello stato trofico l'interruzione dell'isolamento del lago mitigherebbe il rischio di concentrazione dei nutrienti in Monaci. La simulazione non mostra un peggioramento delle caratteristiche di qualità di Fogliano, che presenta anzi un leggero incremento dell'ossigeno disciolto a causa della maggiore circolazione prodotta dalla portata in uscita dalla tubazione.

La presenza del collegamento provocherebbe plausibilmente l'immissione di fitoplancton in Fogliano, incrementandone la concentrazione. Non si ritiene tuttavia problematica tale eventualità, in quanto l'area interessata dall'immissione è prossima alla foce, per cui è già caratterizzata da una maggiore biomassa per gli scambi col mare; l'evoluzione dei produttori è strettamente collegata alla disponibilità di nutrienti, per cui è dal controllo di questi che dipende effettivamente la concentrazione di fitoplancton. Non ci si attende pertanto un'evoluzione differente per gli scenari previsti a causa della presenza del collegamento tra i laghi.

Per quanto riguarda gli altri scenari, le simulazioni hanno riguardato diverse modalità di immissione di acqua "dolce" nei laghi, in modo da ridurre l'incremento di salinità estivo tornando a condizioni di lagune sempre salmastre. Le acque sono prelevate dalla rete di canali circostante, e sono sottoposte a trattamento di fitodepurazione per abbatterne il carico di nutrienti.

L'unica eccezione è costituita dallo **scenario 4** del lago di **Fogliano**, che prevede il pompaggio di una portata elevata dal canale della Colmata, senza trattamento, utilizzando le idrovore esistenti. Lo scenario è stato estremizzato per verificare il limite della stabilità ecologica del lago, e la sensibilità del modello. L'effetto ottenuto è buono, anche sovrabbondante, dal punto di vista della riduzione di salinità e dell'incremento della concentrazione di ossigeno disciolto, soprattutto nelle aree più lontane dalla foce e quindi caratterizzate da minore circolazione. Il carico di nutrienti introdotto risulta però eccessivo, e provoca nel sistema una tendenza all'eutrofizzazione. La biomassa dei produttori aumenta infatti notevolmente per consumare i maggiori nutrienti, e continua a incrementare nel secondo anno simulato, portando ad ulteriori effetti negativi a causa del conseguente accumulo di materia organica.

Il carico di nutrienti introdotto mediante la fitodepurazione (scenari 1 e 2) appare invece più sostenibile dall'ecosistema, che mostra un incremento più contenuto del livello trofico. In particolare lo **scenario 1** (fitodepurazione "piccola") appare già sufficiente a evitare la presenza di concentrazioni saline superiori a quelle del mare, per quanto comunque le acque si mantengano in campo nettamente eurialino per diversi mesi. L'effetto prodotto dall'immissione di nutrienti consiste in un moderato incremento del livello trofico, che risulta comunque non eccessivo e anzi potrebbe indurre effetti positivi per quanto riguarda la biodiversità.

Lo **scenario 2** (fitodepurazione "grande") produce effetti più netti dal punto di vista idrodinamico, mentre l'incremento del carico trofico non varia eccessivamente rispetto allo scenario 1, a causa della limitazione da fosforo. L'immissione di una portata di 50 l/s con queste caratteristiche appare dunque essere un corretto limite superiore per il dimensionamento del sistema filtro, sostenibile dall'ecosistema ed efficace nella regolazione della salinità.

Per il lago di **Monaci** valgono sostanzialmente le medesime considerazioni: la portata minima che garantisce un effetto di regolazione della salinità appare essere quella che caratterizza lo **scenario 1**; un migliore effetto è prodotto con 50 l/s (**scenario 2**) a fronte di un modesto incremento del livello trofico. Essenziale appare però il controllo dell'immissione di fosforo: a parità di altre condizioni infatti un aumento di questo nutriente (**scenario 4**) provoca picchi assai più elevati di fitoplancton, zooplancton, vegetazione bentica, che rischiano di essere non sostenibili dall'ecosistema, e che comunque evolverà ancora più stabilmente verso uno stato trofico dominato da macroalghe, di qualità inferiore.

Si evidenzia come, considerando il piccolo volume del lago, l'attivazione del collegamento proposto nello scenario 3, riducendo significativamente i volumi di acqua di mare pompata, renderebbe assai più efficace (e probabilmente sufficiente) la portata dello scenario 1 per quanto riguarda la regolazione della salinità.

Si precisa infine come appaia di significativo interesse un ampliamento delle conoscenze dal punto di vista delle correlazioni tra l'evoluzione dei parametri chimico-fisici e quelli biologici, che potrebbe essere ottenuto da un affinamento della taratura dei modelli sulla base di dati di monitoraggio specifici per queste componenti, ottenendo uno strumento più efficace nella valutazione anche quantitativa delle stesse.

Risulta in ogni caso opportuna una fase di sperimentazione pluriennale conseguente all'avvio di qualsiasi intervento, con indagini in sito periodiche per la verifica dell'effettiva risposta del sistema, le quali rendano possibile l'eventuale adozione di azioni correttive per ottimizzare l'efficacia dell'intervento stesso.