

MODELLISTICA A SUPPORTO DELLA GESTIONE DELL'AMBIENTE

L. Monte, F. Pompei, S. Fratarcangeli, E. Baldini, ENEA, Divisione Protezione dell'Ambiente

I modelli ambientali basati su complesse conoscenze specialistiche di carattere scientifico possono essere trasformati, utilizzando i moderni sistemi di programmazione e gestione delle informazioni e i personal computer, in strumenti software in grado di fornire un supporto a chi, pur avendo responsabilità di gestione dell'ambiente, non possiede competenze tecniche specifiche nel campo della modellistica matematica. E' dunque possibile, partendo dalle ricerche e dagli studi sul comportamento dei sistemi ambientali, sviluppare quei modelli che, da ostici ed "oscuri"oggetti matematici, possono divenire agevoli strumenti di gestione.

INTRODUZIONE

La modellistica ha come scopo l'organizzazione sistematica della conoscenza in strutture logico-matematiche che consentano di comprendere il "funzionamento" dei sistemi naturali.

I modelli sono uno strumento indispensabile per la gestione ottimale dell'ambiente; essi permettono di stimare l'impatto sugli ecosistemi degli interventi umani.

Nel periodo 1996-1999 l'ENEA ha coordinato il progetto MOIRA (A model-based computerised system for management support to identify optimal remedial strategies for restoring radionuclide contaminated aquatic ecosystems and drainage areas) finanziato dalla Commissione Europea per lo sviluppo di un sistema computerizzato in grado di valutare le strategie ottimali di recupero ambientale di sistemi acquatici contaminati da radionuclidi (Appelgren et al., 1996; Monte, 1997a; Monte et al., 2000).

All'esecuzione del progetto hanno partecipato i seguenti istituti: ENEA, NRG (Olanda), Studsvik Eco&Safety AB (Svezia), Università di Oslo (Norvegia), Università di Uppsala (Svezia), Universidad Politécnica di Madrid (Spagna).

Nell'ambito del progetto sono stati sviluppati modelli per la previsione del comportamento dei radionuclidi nell'ambiente acquatico e degli effetti che opportune contromisure possono avere sui livelli di contaminazione. E' evidente che, a causa delle profonde sinergie esistenti tra i vari processi

ambientali, tali modelli richiedono un approccio multidisciplinare che travalica i limiti tradizionali della radioecologia.

L'ambiente é sede di complicati fenomeni di natura fisica, chimica e biologica che interagiscono in maniera complessa. In particolare lo sviluppo di modelli degli ecosistemi acquatici continentali richiede la conoscenza dei processi che determinano le condizioni fisiche e chimiche delle acque e dei complessi meccanismi attraverso i quali tali condizioni si riflettono sul comportamento delle componenti biotiche dell'ecosistema acquatico.

Alcuni ricercatori definiscono lo studio dei fattori fisici dell'ecosistema con il termine "Ecofisica" (Wesley, 1974). La diffusione ed il trasporto di sostanze contaminanti nei corpi idrici e i processi termici che li influenzano rappresentano alcuni tra i più noti ed importanti fenomeni fisici che occorre considerare per lo sviluppo dei modelli ambientali.

Un aspetto fondamentale dell'attività del modellista é rappresentato dalla necessità di trasferire i risultati del suo lavoro, basato su complessi metodi matematici e su conoscenze scientifiche specialistiche, a personale responsabile della gestione ambientale non necessariamente dotato di competenze tecniche specifiche nell'ambito della modellistica matematica. Pertanto, una volta sviluppato un modello di gestione nasce il problema di trasformarlo in uno strumento di semplice uso che possa essere di supporto alle organizzazioni preposte alla salvaguardia ed alla gestione dell'ambiente. Le moderne tecniche di programmazione dei personal computer permettono di sviluppare codici di calcolo che fanno uso delle più recenti tecnologie informatiche, quali i prodotti software GIS (Geographic Information System), e che possono essere adoperati per la soluzione di problemi complessi di gestione dell'ambiente.

Lo scopo del presente articolo é la descrizione delle attività svolte dall'ENEA nel campo della modellistica ambientale applicata alla gestione di sistemi acquatici contaminati da radionuclidi. Verranno forniti una breve descrizione delle caratteristiche del sistema software sviluppato nell'ambito del progetto MOIRA e i risultati delle ricerche condotte per lo sviluppo di modelli dei meccanismi fisici che influenzano il comportamento dei contaminanti negli ecosistemi lacustri dell'Italia centrale.

IL PROGETTO MOIRA

L'obiettivo del progetto MOIRA è lo sviluppo di un opportuno prodotto software in grado di prevedere la migrazione dei radionuclidi nei sistemi acquatici, l'effetto delle contromisure e l'impatto sociale, economico ed ecologico di queste ultime (Appelgren et al, 1996; Monte, 1997). Il progetto MOIRA ha carattere prettamente multidisciplinare ed è basato sullo sviluppo di modelli per la previsione del comportamento delle sostanze radioattive negli ecosistemi acquatici e per la valutazione dei costi economici, sociali ed ecologici delle contromisure. Mediante l'applicazione di opportune tecniche di analisi multiattributiva, MOIRA consente di valutare l'impatto globale delle contromisure in termini di bilancio tra gli effetti positivi e i costi associati a ciascun tipo di intervento ambientale. La valutazione dell'impatto globale è effettuata assegnando un diverso "peso" ai vari fattori di natura ambientale, sociale ed economica che influenzano le decisioni relative alla scelta delle contromisure più opportune in relazione ai diversi scenari di contaminazione (Ríos-Insua et al. 1997). In particolare l'impatto ecologico viene determinato mediante la definizione di un opportuno indice ("Lake Ecosystem Index", Håkanson & Peters, 1995) che misura lo "stato di salute" di un lago sulla base delle biomasse dei più importanti gruppi funzionali dell'ecosistema lacustre. Il lettore interessato agli aspetti squisitamente tecnici del progetto può consultare la letteratura specializzata (Monte et al., 1997a; Monte & Brittain., 1998; Monte et al., 1999). In questo paragrafo descriveremo in breve le caratteristiche funzionali del sistema software MOIRA.

Il sistema MOIRA è composto essenzialmente dai seguenti moduli software (Hofman et al. 2000; Hofman, 1998).

- a) un sistema operativo di gestione delle varie componenti di MOIRA;
- b) un interfaccia sistema-utente;
- c) un insieme di modelli per la previsione del comportamento dei radionuclidi nell'ambiente acquatico e degli effetti delle contromisure;
- d) un modulo per l'analisi multiattributiva;
- e) un sistema geografico informatico relativo alle caratteristiche principali dei corpi idrici europei.

Il sistema operativo gestisce l'insieme dei moduli software precedentemente elencati.

L'interfaccia con l'utente, mediante "schermate" interattive, consente una semplice ed immediata gestione del programma MOIRA e delle informazioni necessarie per l'esecuzione dei modelli. L'utente può infatti selezionare da una mappa dell'Europa il corpo idrico di interesse al quale il sistema operativo MOIRA associa i dati disponibili (morfometria del sistema, caratteristiche chimico-fisiche, specie ittiche

presenti, ecc.). La figura 1 mostra la “schermata” per la scelta delle diverse opzioni del software. L’utente può effettuare le seguenti operazioni: a) visualizzazione della mappa topografica del sistema idrico (Maps); b) selezione del sistema idrico e delle sue caratteristiche (Selection); c) modifica dei dati di input (Data); d) selezione delle strategie di ripristino (Strategies); e) esecuzione dei modelli (Run); f) individuazione della strategia ottimale di intervento (Optimal strategy); g) descrizione dei risultati (Report). In figura 2 è mostrato il risultato della selezione del fiume Tevere. L’utente può facilmente controllare i dati relativi al corpo idrico ed eventualmente modificarli. Le figure 3 e 4 mostrano come l’utente possa prevedere l’uso di diverse strategie di ripristino ambientale e come possa esaminare i risultati dei vari modelli (le informazioni possono essere ottenute selezionando le opportune icone). In figura 5 è riportata la schermata relativa alla valutazione comparata dell’efficacia delle diverse contromisure. La “classifica” ordina le varie strategie secondo la loro efficacia in base ai risultati dell’analisi multiattributiva (Ríos-Insua et al., 1997) tenendo conto degli impatti ecologici, economici e sociali e degli effetti positivi dovuti alla riduzione della contaminazione. Le strategie di recupero e le contromisure considerate sono le seguenti: a) contromisure chimiche (“lake liming” e “potash treatment”); b) divieti d’uso e consumo di acqua e specie ittiche commestibili; c) restrizione dell’accesso alle aree contaminate; d) controllo del “runoff”(flussi d’acqua attraverso i bacini di drenaggio); e) rimozione di sedimenti contaminati; f) rimozione della contaminazione dai bacini (decontaminazione del suolo, rimozione di neve e ghiaccio contaminati, ecc.).

I risultati ottenuti vengono quindi riassunti in un opportuno “report” (vedi figura 6) che descrive: a) le principali caratteristiche del corpo idrico (morfologia, parametri chimico-fisici); b) la distribuzione della popolazione residente nell’area di interesse in classi di età; c) la deposizione al suolo del ^{137}Cs e del ^{90}Sr ; d) le dosi di radiazione alla popolazione, il “Lake Ecosystem Index” ed i costi economici corrispondenti a ciascuna strategia; e) la “classifica” delle strategie di ripristino.

Il sistema MOIRA include, oltre ai modelli di migrazione dei radionuclidi, ed al modulo software per l’analisi multiattributiva, un modello per il calcolo dei costi economici, un modello per il calcolo del “Lake Ecosystem Index” ed un modello per la valutazione della dosi alla popolazione (Jiménez & Gallego, 1997).

I MODELLI DI MIGRAZIONE

Il “cuore” del sistema software MOIRA é costituita dai modelli di migrazione per la previsione dell’andamento nel tempo della contaminazione nei corpi idrici e dell’effetto che le contromisure hanno su tali livelli. I modelli rappresentano il risultato delle ricerche scientifiche condotte durante gli anni 90 alla luce delle nuove esperienze acquisite in seguito alle conseguenze ambientali dell’incidente di Chernobyl.

L’ENEA ha condotto studi e ricerche sul comportamento di radionuclidi nei laghi e nei fiumi ed ha sviluppato i relativi modelli. Come é stato già accennato nell’introduzione, lo sviluppo di questi ultimi richiede un’analisi globale dell’ecosistema acquatico basato su conoscenze di carattere interdisciplinare. Attenzione particolare é stata rivolta ai sistemi lacustri dell’Italia centrale ed ai bacini idrici complessi. Approcci modellistici innovativi (Monte, 1998; Monte & Håkanson, 1999) hanno consentito di sviluppare un programma software che, nell’ambito del sistema MOIRA, permette di prevedere il comportamento dei radionuclidi e gli effetti delle contromisure in sistemi acquatici complessi composti di fiumi, laghi, laghi artificiali e relativi bacini di drenaggio. La flessibilità del programma ne consente l’applicazione a qualsivoglia sistema idrico. Il modello é stato validato utilizzando dati sperimentali raccolti in decine di sistemi acquatici europei (Monte et al., 1997b; Monte 2000).

I sistemi lacustri dell’Italia centrale rappresentano una risorsa di rilevante valore ambientale ed economico. Turismo, pesca ed uso delle acque sono i principali fattori connessi allo sviluppo economico delle aree interessate.

L’analisi e la modellistica dei fenomeni fisici che hanno luogo nei laghi sono di importanza fondamentale per comprendere e prevedere l’andamento dei processi che influenzano la distribuzione ed il comportamento delle sostanze presenti nelle acque e degli organismi che vivono nel lago. Tra essi i fenomeni di scambio di energia termica tra il lago e l’ambiente circostante sono di rilevante importanza perché determinano le condizioni termiche del lago e la stratificazione delle acque che influenza la distribuzione delle sostanze disciolte, sia antropogeniche che naturali, e dei micro-organismi presenti nel lago.

Il sistema lacustre riceve energia termica dall’ambiente sotto forma di radiazione solare globale (diretta e diffusa) e radiazione infrarossa atmosferica e cede calore all’ambiente mediante irraggiamento (nell’infrarosso) ed evaporazione (Monte et al., 1991a). Una ulteriore componente non trascurabile del

bilancio energetico è rappresentata dal calore che viene scambiato per conduzione tra l'acqua e l'atmosfera (calore sensibile).

Poiché la densità dell'acqua varia con la temperatura, le masse d'acqua si stratificano a profondità diverse in funzione della loro temperatura.

Le acque dei laghi profondi dell'Italia centrale presentano fenomeni di stratificazione termica in corrispondenza del periodo dell'anno che va, approssimativamente, dalla seconda metà della primavera alla fine dell'autunno (Monte et al., 1996; Monte et al., 1993a; Monte et al., 1991a).

In tale periodo, muovendosi dalla superficie verso il fondo, è possibile individuare tre strati, caratterizzati da diverse condizioni termiche, denominati rispettivamente epilimnion, termoclino e hypolimnion. In prossimità della superficie del lago, l'epilimnion, lo strato più caldo delle acque lacustri, presenta un profilo di temperatura omogeneo; l'hypolimnion è invece costituito dagli strati profondi a temperatura più bassa. Il termoclino è una regione intermedia attraverso la quale avviene la transizione della temperatura dai valori più elevati che caratterizzano l'epilimnion a quelli dell'hypolimnion.

La stratificazione termica rappresenta un fenomeno di notevole importanza dal punto di vista chimico, fisico e biologico; essa gioca un ruolo importante in relazione alla distribuzione della concentrazione delle sostanze disciolte nelle acque dei laghi in funzione della profondità

Infatti la diffusione di tali sostanze attraverso il termoclino risulta notevolmente inferiore a quella che ha luogo normalmente in condizioni di assenza di stratificazione termica; in conseguenza di quest'ultima, le sostanze disciolte generalmente presentano concentrazioni diverse alle diverse profondità.

Il fenomeno riveste una notevole importanza in relazione a eventuali episodi di contaminazione da sostanze artificiali delle acque dei laghi. Le sostanze disciolte immesse accidentalmente negli strati superficiali delle acque durante la stratificazione si accumulano nell'epilimnion. Di conseguenza le concentrazioni possono essere considerevolmente più elevate di quelle riscontrabili durante il periodo di assenza di stratificazione termica (Monte et al., 1991b). La figura 7 mostra le concentrazioni di ^{134}Cs , radionuclide immesso in atmosfera in seguito all'incidente di Chernobyl, nell'epilimnion del lago di Bracciano. È possibile constatare che la concentrazione durante l'estate e l'autunno 1986 nelle acque superficiali del lago era notevolmente più elevata delle concentrazioni negli anni successivi. Infatti durante il citato periodo estivo il radionuclide risultava prevalentemente confinato nello strato superiore delle acque per una profondità di circa 20 o 30 metri. Nel periodo successivo la destratificazione termica del lago comportò la diluizione rapida del radionuclide nell'intero volume del corpo idrico. La dinamica

di contaminazione delle acque riveste particolare importanza non soltanto in relazione ai potenziali usi delle acque stesse (irrigazione, prelievo di acqua potabile, balneazione) ma anche in vista del trasferimento delle sostanze contaminanti alle specie ittiche (Monte et al., 1993b; Monte et al., 1991c)

La presenza del termoclino influenza anche la distribuzione nelle acque lacustri di sostanze caratterizzate da una dinamica di produzione-consumo dipendente dalla profondità. Infatti, a causa della scarsa diffusione attraverso il termoclino, tali sostanze si accumulano dove è maggiore l'attività di produzione e minore la diffusione verso gli altri strati di acqua. E' questo il caso, durante la stagione estiva, dell'ossigeno disciolto nelle acque (vedi figura 8). Si notano, infatti, valori elevati di ossigeno disciolto in corrispondenza del termoclino dove alte concentrazioni di clorofilla (fitoplancton) e livelli di flusso di radiazione solare relativamente elevati sono responsabili di una maggiore attività fotosintetica e di una conseguente più elevata produzione di ossigeno. Quest'ultimo, a causa dei limitati processi di diffusione, resta confinato nello strato d'acqua compreso tra i 20 e i 40 metri di profondità.

Come mostra la figura 8 anche il fitoplancton si distribuisce in maniera non omogenea nella colonna d'acqua durante il periodo di stratificazione. I meccanismi responsabili della particolare distribuzione delle varie sostanze presenti nelle acque sono numerosi. Fattori limitanti quali la scarsità di azoto nitrico e fenomeni di inibizione correlati a elevati livelli di luce solare (Hill, 1996) possono causare concentrazioni di fitoplancton nell'epilimnion inferiori a quelli rilevati nel termoclino. Ovviamente negli strati d'acqua più profondi livelli troppo bassi di luce implicano l'impossibilità di sopravvivenza del fitoplancton.

La profondità di penetrazione della luce solare nelle acque del lago in relazione alla torbidità delle acque è uno dei fattori che influenza la profondità del termoclino e la distribuzione del fitoplancton. In acque torbide la penetrazione della luce può essere limitata soltanto agli strati di acqua più superficiali. In generale, a parte i fenomeni di assorbimento e riflessione in corrispondenza della superficie, la luce che penetra nelle acque dei laghi ha un andamento esponenziale con la profondità:

$$\Phi(z) = K\Phi e^{-\eta z}$$

dove Φ è il flusso dei fotoni in superficie, $\Phi(z)$ è il flusso di fotoni alla profondità z , η è il coefficiente di attenuazione (m^{-1}) e K è una costante che tiene conto dei summenzionati fenomeni di riflessione ed assorbimento della luce in corrispondenza degli strati superficiali d'acqua.

La figura 9 mostra un esempio di andamento del flusso di fotoni ($\mu\text{moli m}^{-2} \text{s}^{-1}$) di lunghezza d'onda compresa tra 400 nm e 700 nm misurati nelle acque del lago di Bracciano. Tale intervallo corrisponde allo spettro energetico dei fotoni che danno luogo alla fotosintesi clorofilliana.

Nei laghi vulcanici dell'Italia centrale i valori di η sono generalmente piuttosto bassi a causa della notevole trasparenza delle acque. Ad esempio, misure effettuate nel lago di Bolsena hanno fornito un valore del coefficiente di attenuazione compreso approssimativamente fra 0.155 e 0.250 m^{-1} .

I profili di clorofilla sono stati ottenuti mediante fluorimetro FluoroProbe della bbe Moldaenke GmbH (Kiel, Germania). I fluorimetri consentono di determinare la concentrazione di clorofilla-a nell'acqua sfruttando i processi di fluorescenza. Essi consentono anche di valutare, in una certa misura, le specie di alghe presenti nelle acque analizzando la fluorescenza a diverse lunghezze d'onda. La radiazione solare è stata misurata con un sensore "LI-193SA Spherical Quantum Sensor" della LI-COR (NE, USA) in grado di determinare la così detta "Photosynthetically Active Radiation (PAR)" (radiazione solare in grado di produrre la fotosintesi). Parametri quali la temperatura e l'ossigeno disciolto sono stati determinati mediante una sonda multiparametro OCEAN SEVEN della Idronaut s.r.l. (Milano).

CONCLUSIONI

La corretta gestione dei sistemi idrici richiede la messa a punto di modelli matematici in grado di prevedere e valutare l'evoluzione della contaminazione e gli effetti delle contromisure per il loro recupero.

Nell'ultimo decennio si è assistito alla diffusione di personal computer sempre più veloci e potenti ed allo sviluppo di molti strumenti di programmazione dei computer in grado di permettere una più agevole gestione dei dati e una più proficua produzione di software applicativi. Conseguenza immediata di tali nuove tecnologie informatiche è la possibilità offerta a ricercatori e tecnici di sviluppare programmi software per la gestione dell'ambiente basati su modelli matematici e banche dati che, nonostante la loro complessità, possono essere agevolmente utilizzati su personal computer anche da personale non necessariamente esperto in problemi di carattere matematico o informatico. Grazie a tali sistemi è

possibile trasformare conoscenze e tecniche di carattere squisitamente specialistico, spesso formulate secondo approcci metodologici di notevole complessità e di difficile accessibilità per i non esperti, in strumenti di facile uso che possono essere di efficace supporto agli organismi addetti alla gestione ed alla salvaguardia dell'ambiente. Il sistema MOIRA è stato sviluppato sulla base della consapevolezza di tali principi. In altri termini MOIRA ha rappresentato il compimento di un programma che prevede la produzione di risultati scientifici e il loro trasferimento dalla sfera prettamente specialistica alle applicazioni pratiche nella sfera più squisitamente gestionale.

Dal punto di vista scientifico, fondamentale importanza ha avuto lo sviluppo di modelli matematici in grado di valutare l'evoluzione dei sistemi ambientali. Tali modelli sono basati su metodologie innovative recentemente sviluppate (Monte & Håkanson, 1999).

BIBLIOGRAFIA

A. Appelgren, U. Bergström, E. Gallego Díaz, L. Håkanson, R. Heling, L. Monte, An outline of a model-based expert system to identify optimal remedial strategies for restoring contaminated aquatic ecosystems: the project "MOIRA". Rapporto Tecnico ENEA RT/AMB/96/17, 1996

L. Håkanson & R. H. Peters, Predictive limnology. Methods for predictive modelling. SPB Academic Publishing, Amsterdam, The Netherlands, 1995

W. Hill, Effects of light. In: Algal Ecology. Edited by R.J. Stevenson, M.L. Bothwell, R.L. Lowe. Academic Press, California, 1996.

D. Hofman, Design and development of the MOIRA software framework. In: Principles for the development and implementation of the MOIRA computerised system. A cura di L. Monte and J.E. Brittain. Rapporto Tecnico ENEA RT/AMB/98/4, 1998

D. Hofman, A. Appelgren, U. Bergström, S. Karlsson, L. Mathiasson, S. Nordlinder, The MOIRA software framework, geographical information system and integration models. In: MOIRA final report, 2000.

D. Hofman, MOIRA User's manual. 2000

F. Jiménez & F. Gallego, A dose model for radionuclide contaminated water bodies;. In: Prototype models for the MOIRA system. A cura di L. Monte, L. Håkanson & J. Brittain. Rapporto tecnico ENEA, AMB (97) 5, 1997

L. Monte, La modellistica per la gestione e il recupero dell'ambiente: il Progetto MOIRA. Energia Ambiente Innovazione, Anno 43, 4, 1997

L. Monte. Predicting the migration of dissolved toxic substances from catchments by a collective model. Ecological Modelling 110, pagg. 269-279, 1998

L. Monte, A generic model for assessing the effects of countermeasures to reduce the radionuclide contamination levels in rivers and complex catchments. In via di pubblicazione, 2000

L. Monte, C. Battella, S. Fratarcangeli, F. Pompei, S. Quaggia - Il Comportamento Termodinamico di Alcuni Laghi dell'Italia Centrale. Technical Report ENEA RT/AMB/91/30, 1991a

L. Monte, S. Fratarcangeli, S. Quaggia, F. Pompei & G. Andradi - A Predictive Model for the Behaviour of Dissolved Radioactive Substances in Stratified Lakes. - J. Environ. Radioactivity 13, pagg. 297-308, 1991b

L. Monte, S. Fratarcangeli, F. Pompei, S. Quaggia & C. Battella, - A Model Assessing the Levels of Radioactivity Contamination of the Main Species of Fishes Living in Some Lakes of Central Italy. - Proceedings of 2nd Italian-Austrian Radiation Protection Symposium "New Trends and Developments in Radiation Protection". Bologna (Italy) , pagg. 227-234, 1991c

L. Monte, C. Battella, S. Fratarcangeli, F. Pompei, S. Quaggia - Indagine sulle caratteristiche termodinamiche del lago di Bolsena RT/AMB/93/03, 1993a

L. Monte, S. Fratarcangeli, F. Pompei, S. Quaggia & C. Battella, - Bioaccumulation of ^{137}Cs in the Main Species of Fishes in Lakes of Central Italy. - Radiochimica Acta 60, pagg. 219-222, 1993b

L. Monte, E. Baldini, C. Battella, S. Fratarcangeli, F. Pompei - Bilancio termico dei principali laghi dell'Italia centrale. ENEA, RT/AMB/96/1, 1996

L. Monte, L. Håkanson & J. Brittain (a cura di) Prototype Models for the MOIRA Computerised System. Rapporto Tecnico ENEA AMB (97) 5, 1997a

L. Monte, E. Baldini, C. Battella, S. Fratarcangeli & F. Pompei - Modelling the radionuclide balance in some water bodies of central Italy. J. Environ. Radioactivity, Vol. 37, No. 3, pagg. 269-285 , 1997b

L. Monte, J.E. Brittain, L. Håkanson, E. Gallego Diaz (a cura di). MOIRA models and methodologies for assessing the effectiveness of countermeasures in complex aquatic systems contaminated by radionuclides. Edited by L. Monte, J.E. Brittain, L. Håkanson, E. Gallego Diaz. ENEA, RT/AMB/99/1, 1999

L. Monte, J. Van der Steen, U. Bergström, E. Gallego, L. Håkanson, J. Brittain. MOIRA, A model-based computerised system for management support to identify optimal remedial strategies for restoring radionuclide contaminated aquatic ecosystems and drainage areas. CE contract FI4PCT 960036. Final Report Submitted to EC., 2000

L. Monte & J.E. Brittain (a cura di) Principles for the development and implementation of the MOIRA computerised system. Edited by L. Monte and J.E. Brittain. Rapporto Tecnico ENEA RT/AMB/98/4, 1998

L. Monte & L. Håkanson - On new approaches to structure mathematical models and increase predictive power for the transport and the biouptake of radionuclides in aquatic system. In: Mathematics and computation , Reactor Physics and environmental Analysis in Nuclear Application, Vol 2 pp. 1530-1541. Eds J. M. Aragonés, Madrid, Spain, 1999

Ríos-Insua, S., Ríos-Insua, D., Mateos A. & E. Gallego (1997). Overview of decision analysis applied to the evaluation of remedial measures. In: Prototype models for the MOIRA system. A cura di L. Monte, L. Håkanson & J. Brittain. Rapporto tecnico ENEA, AMB (97) 5, 1997

J.P. Wesley, Ecophysics - The Application of Physics to Ecology. Charles C Thomas • Publisher, Springfield, Illinois, USA, 1974

CAPTIONS

Figura 1 - Schermata del software MOIRA per la scelta delle diverse opzioni consentite (Figura tratta da Hofmann, 2000).

Figura 2 - Esempio di selezione di un sistema acquatico (fiume Tevere) in una specifica area geografica (Italia centrale). Il sistema MOIRA richiama le “routine” del software MapInfo per la gestione delle informazioni morfologiche, topografiche e socio-economiche relative al sistema acquatico. Nel caso dell’esempio riportato, l’utente può intervenire per modificare i dati di input (ad esempio il “runoff”). (Figura tratta da Hofmann, 2000).

Figura 3 - L’utente può definire diverse strategie di recupero e ordinare al sistema di eseguire i diversi modelli di previsione per ciascuna strategia. (Figura tratta da Hofmann, 2000).

Figura 4 - L'utente può esaminare, selezionando le relative icone, i risultati dell'esecuzione dei modelli MOIRA per ciascuna strategia di ripristino (o contromisura). (Figura tratta da Hofmann, 2000).

Figura 5 - MOIRA effettua il "ranking" delle diverse strategie di intervento in relazione al bilancio globale tra i costi ed i benefici mediante l'applicazione di tecniche di analisi multiattributiva (Rios-Insua et al., 1997). (Figura tratta da Hofmann, 2000).

Figura 6 - I risultati vengono riassunti in un opportuno "report" in formato "htm" per l'uso mediante Internet Explorer. (Figura tratta da Hofmann, 2000).

Figura 7 - Effetti della stratificazione termica sulla distribuzione di sostanze antropogeniche introdotte nelle acque del lago di Bracciano. Il ^{134}Cs depositatosi sulla superficie del lago a seguito dell'incidente di Chernobyl è rimasto confinato per alcuni mesi nello strato superiore (epilimnion) delle acque lacustri causando livelli di concentrazione dell'ordine di $20\text{-}30\text{ Bq m}^{-3}$. Alla fine dell'autunno 1996, la destratificazione delle acque comportò la diluizione del radionuclide nell'intero volume del lago. Conseguentemente la concentrazione nell'epilimnion si ridusse di circa un fattore 4 nell'arco di pochi mesi.

Figura 8 - La stratificazione termica influenza la distribuzione delle sostanze disciolte nel lago e del fitoplancton. In ascisse sono riportati i rapporti di ciascun parametro con il suo valore massimo. Misure eseguite nel lago di Bracciano (estate 1999). Durante il periodo invernale l'ossigeno e la temperatura mostrano un profilo praticamente omogeneo lungo l'intera colonna d'acqua mentre il fitoplancton risulta omogeneamente distribuito fino alla profondità consentita per i processi fotosintetici.

Figura 9 - Andamento del flusso di radiazione solare fotosinteticamente attiva con la profondità. Misure eseguite il 2/2/2000 nel lago di Bracciano. Il coefficiente di attenuazione della radiazione nelle acque del lago è pari a 0.148 m^{-1} .

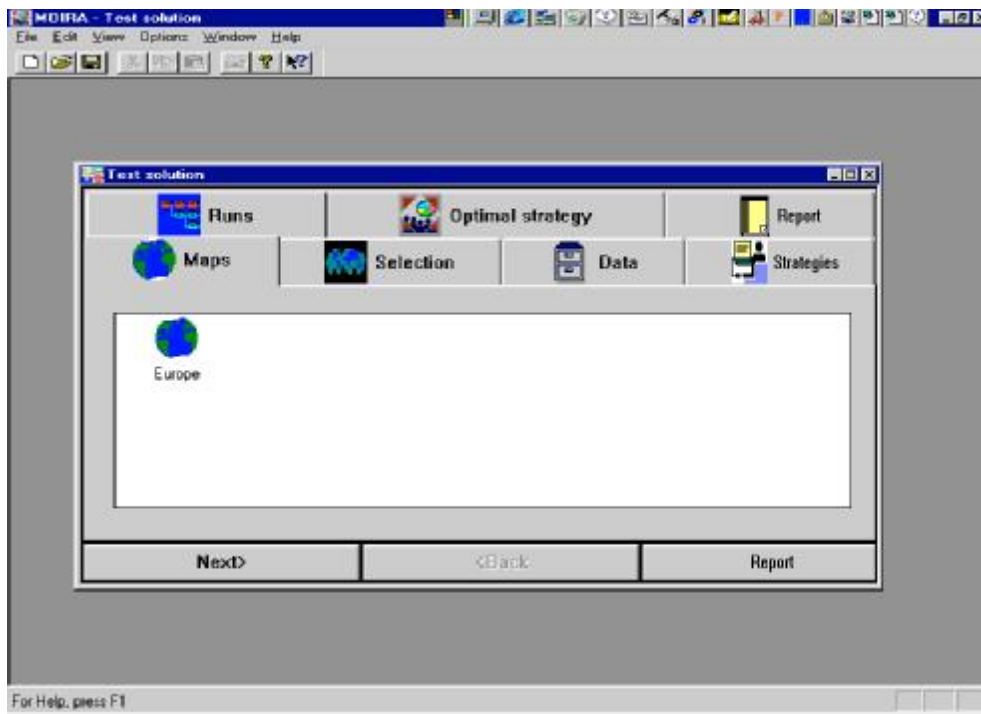


Figura 1

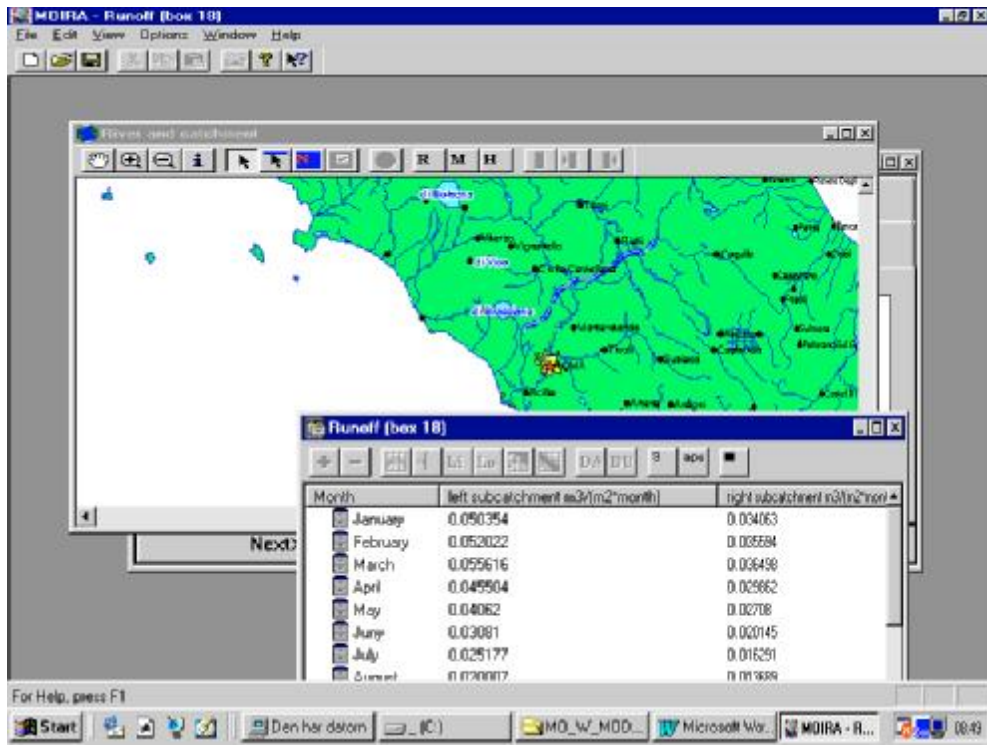


Figura 2

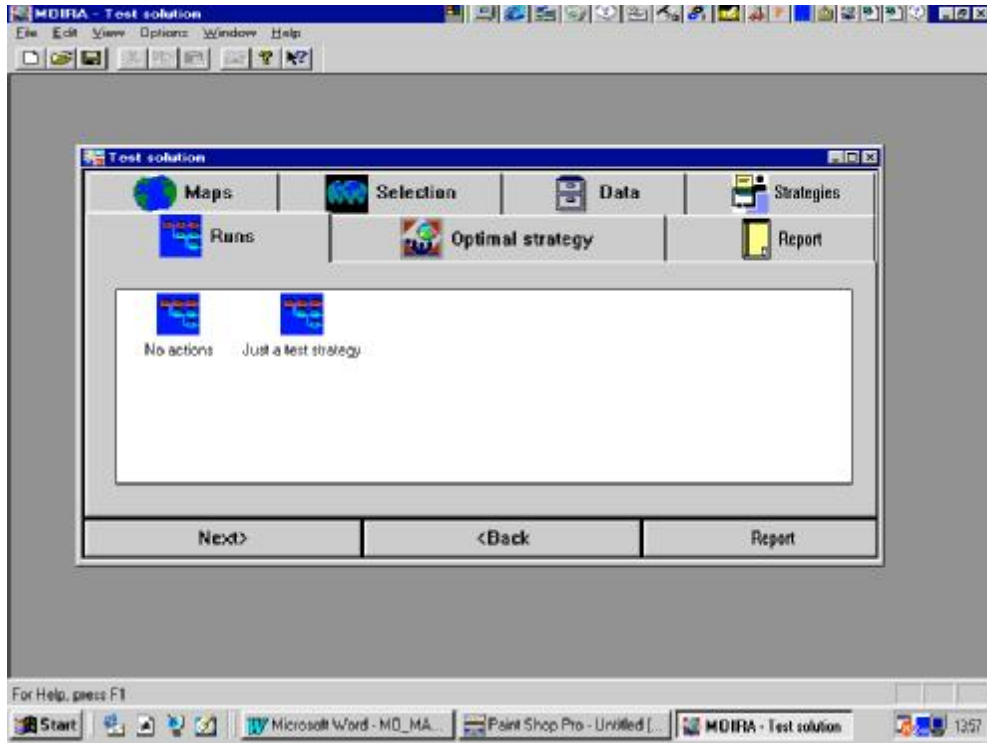


Figura 3

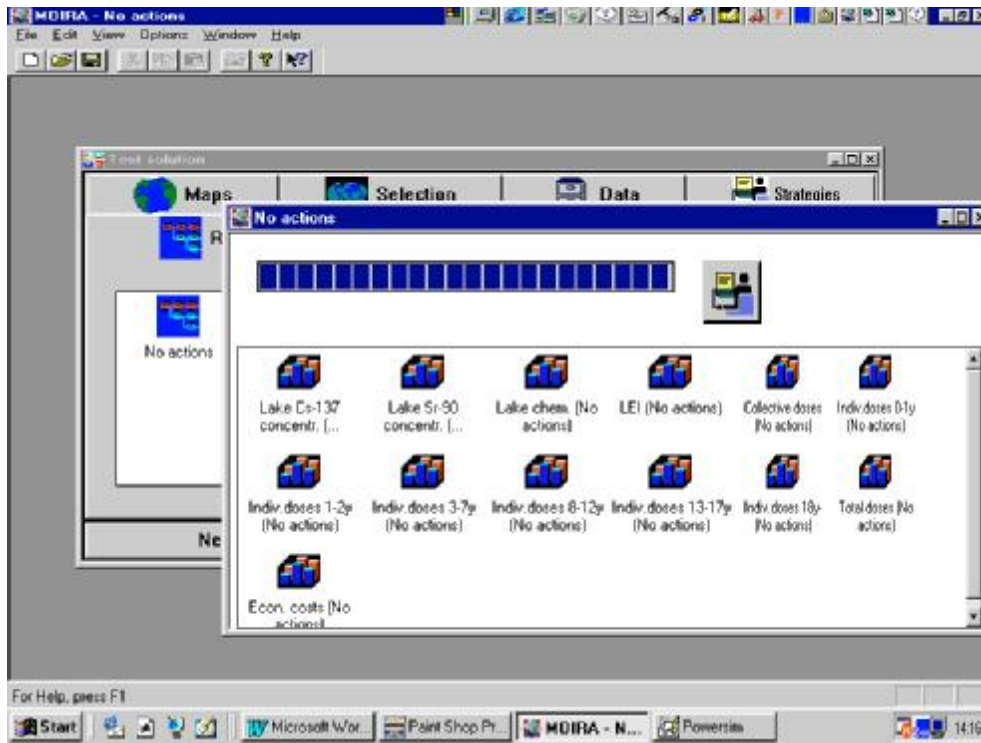


Figura 4

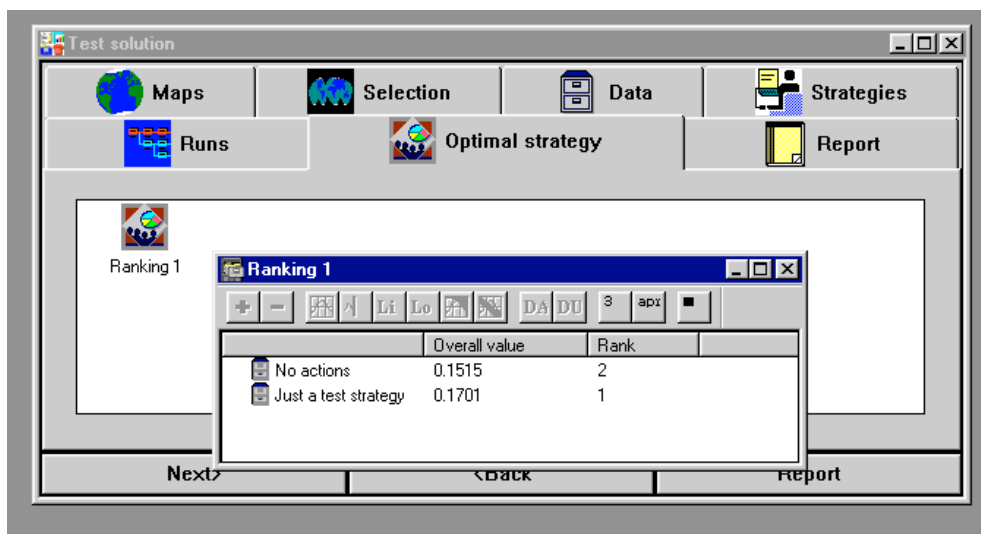


Figura 5

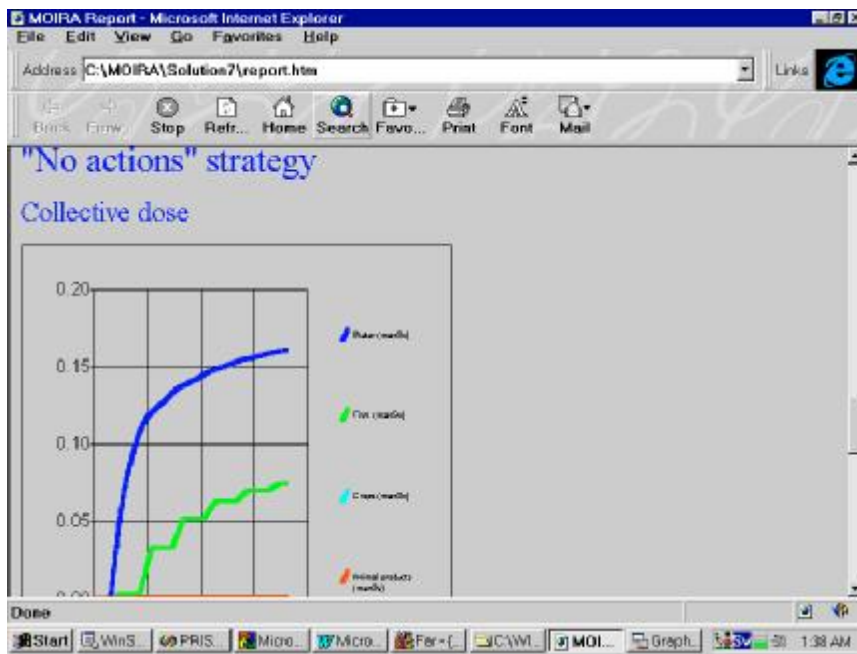


Figura 6

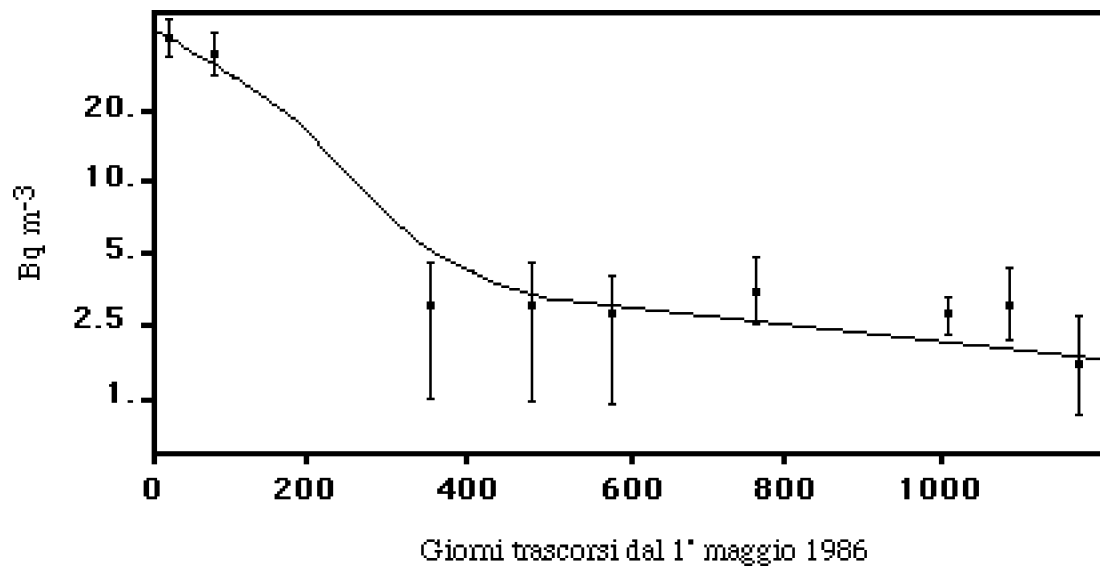


Figura 7

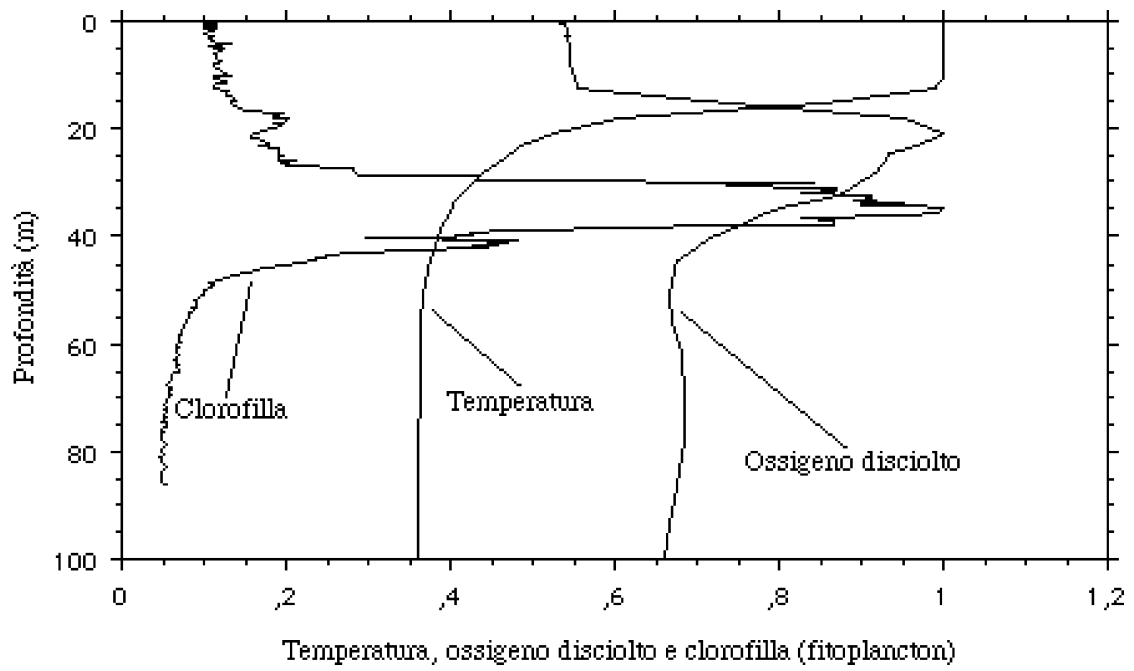


Figura 8

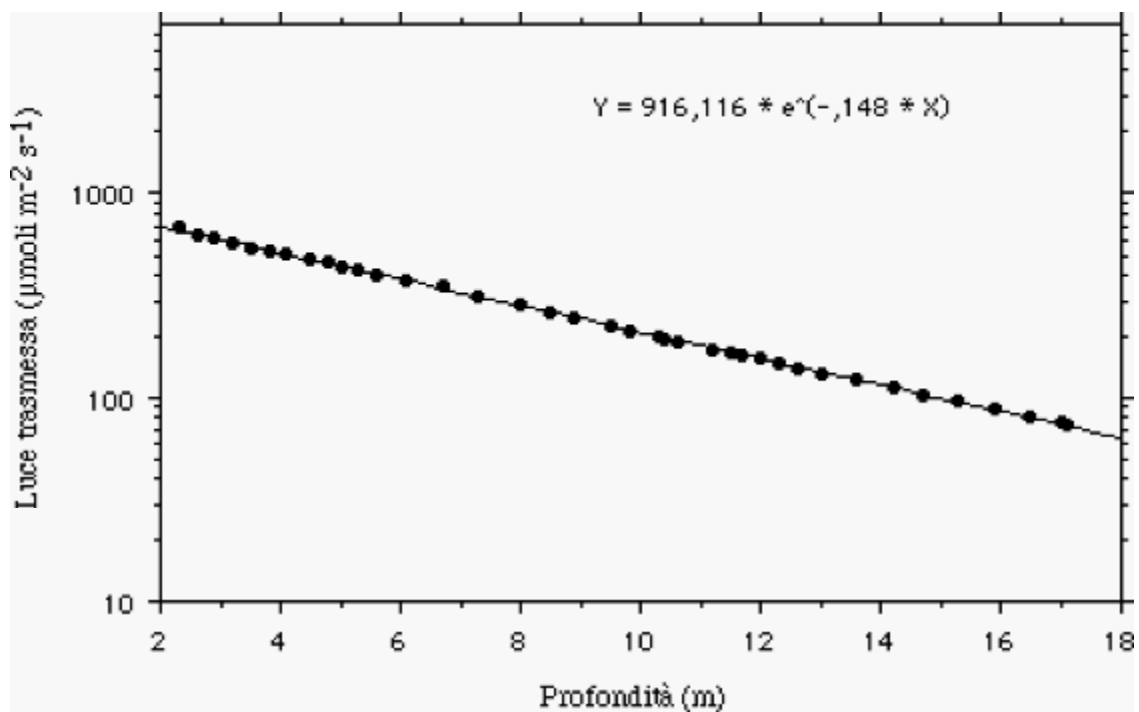


Figura 9