

MODELLI DEMOGRAFICI CON BASE FISILOGICA INTEGRATI IN SISTEMI D'INFORMAZIONE GEOGRAFICA PER LA GESTIONE DEI FITOFAGI SU BASE ECOLOGICA IN AGROECOSISTEMI MEDITERRANEI PERENNI SOGGETTI A CAMBIAMENTI CLIMATICI

L. PONTI^{1,2}, Q.A. COSSU³, A.P. GUTIERREZ^{2,4}

¹ Gruppo "Lotta alla Desertificazione", Dipartimento Biotecnologie, Agroindustria e Protezione della Salute, ENEA, Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente
Via Anguillarese, 301, 00060 Santa Maria di Galeria (Roma)

² CASAS - Center for the Analysis of Sustainable Agricultural Systems, Kensington, CA, 94707, USA

³ Servizio Agrometeorologico Regionale per la Sardegna - Viale Porto Torres, 119, 07100 Sassari

⁴ Division of Ecosystem Science, Department of Environmental Science, Policy & Management, University of California - Berkeley, CA, 94720, USA
quartese@gmail.com

RIASSUNTO

Il bisogno di strumenti analitici capaci di fornire una sintesi dei dati ecologici è sempre più stringente, poiché oggi per progettare e gestire agroecosistemi sostenibili si deve tener conto della crescente interferenza del cambiamento globale, sotto forma di nuovi input agrotecnici, specie esotiche invadenti e cambiamenti climatici. Queste considerazioni hanno rilevanza particolare per il Bacino del Mediterraneo, un'area del pianeta particolarmente soggetta ai cambiamenti climatici e già minacciata da mutamenti ambientali di natura locale, desertificazione compresa. Grazie all'integrazione di modelli demografici con base fisiologica (PBDM) in sistemi d'informazione geografica (GIS) è possibile comprendere in maniera dinamica agroecosistemi complessi sottoposti al cambiamento globale, ivi compresi i cambiamenti climatici. Lo scopo di questo contributo è presentare le potenzialità applicative dello strumento integrato PBDM/GIS per la gestione dei fitofagi su base ecologica in sistemi vigneto ed oliveto soggetti ai cambiamenti climatici.

Parole chiave: vite, olivo, controllo biologico, specie esotiche invadenti, desertificazione

SUMMARY

PHYSIOLOGICALLY BASED DEMOGRAPHIC MODELS INTEGRATED INTO GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS FOR ECOLOGICALLY BASED PEST MANAGEMENT IN PERENNIAL MEDITERRANEAN AGROECOSYSTEMS UNDER CLIMATE CHANGE

Analytical tools that provide a synthesis of ecological data are increasingly needed to design and maintain sustainable agroecosystems increasingly disrupted by global change in the form of agro-technical inputs, invasive species, and climate change. This is particularly relevant to the Mediterranean Basin, a climate change hot-spot already threatened by local environmental changes including desertification. Physiologically based demographic models (PBDM) integrated into geographic information systems (GIS) provide a dynamic understanding of complex agricultural systems in the face of global change including climate warming. The present paper aims to provide an overview on potential applications of the integrated PBDM/GIS tool to ecologically based pest management in vineyard and olive systems under climate change.

Keywords: grape, olive, biological control, invasive species, desertification

INTRODUZIONE

La complessità degli agroecosistemi è sfuggita all'analisi in passato. Ogni specie animale e vegetale ha infatti requisiti di crescita, sopravvivenza e riproduzione propri, che ne determinano distribuzione geografica, abbondanza ed interazioni con le altre specie (Andrewartha e Birch, 1954). Per analizzare tale complessità è necessario sviluppare modelli che descrivano in maniera generale i processi dinamici di crescita, sviluppo e comportamento delle specie in relazione alle condizioni meteorologiche, alle altre specie ed ai fattori abiotici. Il bisogno di strumenti di analisi degli agroecosistemi è poi sempre più stringente, data la crescente interferenza del cambiamento globale, sotto forma di nuovi input agrotecnici, specie esotiche invadenti e cambiamenti climatici (Gutierrez *et al.*, 2006a). Queste considerazioni hanno rilevanza particolare per il Bacino del Mediterraneo, un'area del pianeta particolarmente soggetta ai cambiamenti climatici (Giorgi e Lionello, 2007) e già minacciata da mutamenti ambientali di origine locale, desertificazione compresa (Iannetta, 2006).

I modelli demografici con base fisiologica (PBDM, "physiologically based demographic models") sono stati sviluppati per catturare la complessa dinamica degli agroecosistemi (Gutierrez, 1996). Detti modelli possono evidenziare le criticità nello sviluppo o nella crescita delle specie peciloterne in condizioni di temperatura al limite vitale, ma anche inglobare importanti aspetti biologici, quali la capacità che talune specie hanno di andare incontro a dormienza in condizioni estreme di temperatura e/o umidità relativa. Questi fenomeni influenzano notevolmente la fenologia delle specie animali e vegetali, e possono essere determinanti per la sopravvivenza di una specie in una certa area. I modelli in oggetto sono in grado di riprodurre queste ed altre caratteristiche biologiche, fornendo previsioni sugli agroecosistemi di regioni vaste come il Bacino del Mediterraneo, in base alle condizioni meteorologiche registrate o attese (ad es. mediante modelli climatici). Le previsioni dei PBDM possono essere rappresentate su mappa mediante la tecnologia dei sistemi d'informazione geografica (GIS).

L'integrazione PBDM/GIS costituisce quindi uno strumento idoneo a valutare la crescente complessità degli agroecosistemi legata ai molteplici aspetti del cambiamento globale. Lo strumento integrato PBDM/GIS si può infatti utilizzare per valutare l'impatto delle specie esotiche invadenti e per fornire indicazioni sul tipo di nemico naturale da utilizzare per ottenerne il controllo biologico (Gutierrez *et al.*, 2007). Con questo strumento è inoltre possibile analizzare su vasta scala il ruolo delle colture transgeniche nella protezione delle piante (Gutierrez e Ponsard, 2006) nonché gli effetti dei cambiamenti climatici sugli ecosistemi naturali ed agrari (Gutierrez *et al.*, 2006b). Lo scopo del presente contributo è presentare le potenzialità applicative di uno strumento integrato PBDM/GIS per la gestione dei fitofagi su base ecologica in sistemi vigneto ed oliveto soggetti ai cambiamenti climatici.

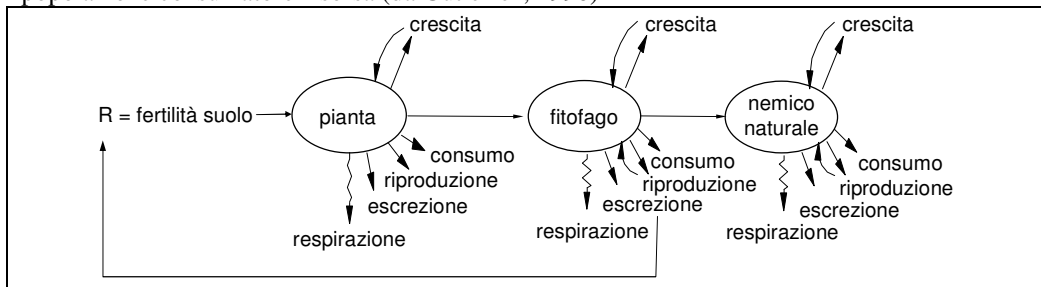
MATERIALI E METODI

Modelli ecologici: l'approccio dei PBDM

I modelli che sono alla base dello strumento integrato PBDM/GIS forniscono una comprensione dinamica di sistemi biologici complessi e sono quindi una maniera appropriata di valutare gli effetti dei cambiamenti climatici sugli agroecosistemi. Il fondamento logico dell'approccio ai modelli ecologici descritto nel presente contributo è che tutti gli organismi viventi si possono considerare consumatori ed hanno quindi problemi simili di acquisizione (input) ed allocazione (output) delle risorse (Gutierrez, 1996). Identificando i processi che accomunano tutti i livelli trofici e mettendo in relazione detti processi con la dinamica di popolazione delle specie, è possibile utilizzare gli stessi modelli di risposta funzionale (modello di acquisizione delle risorse) e numerica (tassi vitali) per descrivere la dinamica delle

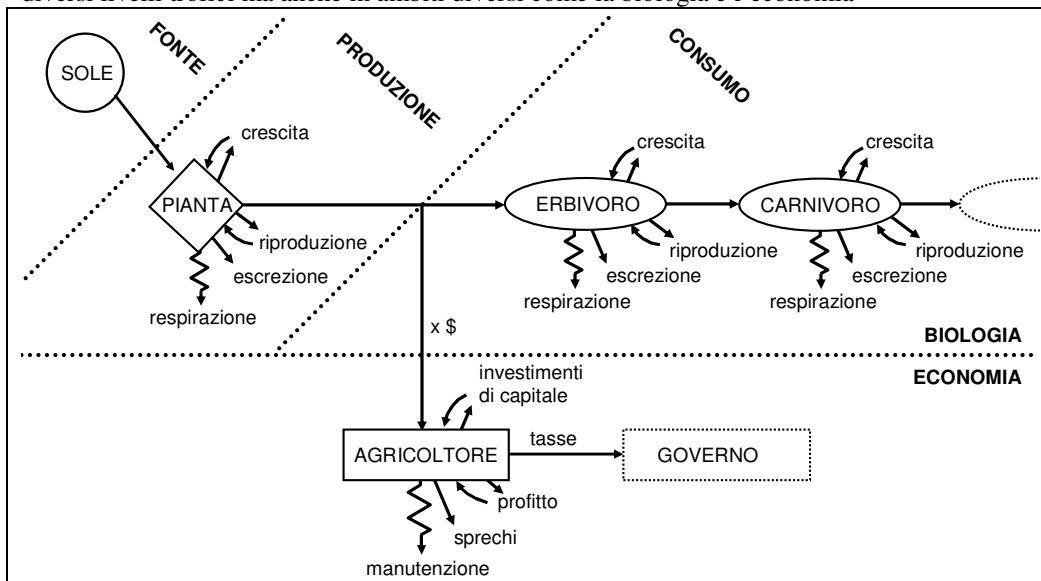
specie nei sistemi tritrofici (Gutierrez *et al.*, 1975; Gutierrez, 1992, 1996). Il flusso di materia (e quindi di energia) (figura 1) relativo al modello di dinamica di popolazione consumatore-risorsa, descrive quindi la dinamica di tutti i livelli trofici, nei quali i flussi di input e output sono rispettivamente caratterizzati da un andamento simile e descritti dalle stesse funzioni.

Figura 1. Flusso multitrofico di materia (e quindi di energia) nel modello di dinamica di popolazione consumatore-risorsa (da Gutierrez, 1996)



Gli stessi modelli sono stati estesi all'economia (figura 2) dei sistemi umani (Regev *et al.*, 1998) e biologici (Gutierrez e Regev, 2005), e possono quindi essere utilizzati per modellare le componenti eco-sociali dei sistemi di controllo integrato dei fitofagi (IPM, "integrated pest management") (Baumgärtner *et al.*, 2007).

Figura 2. Processi comuni di acquisizione ed allocazione delle risorse sono riscontrabili nei diversi livelli trofici ma anche in ambiti diversi come la biologia e l'economia



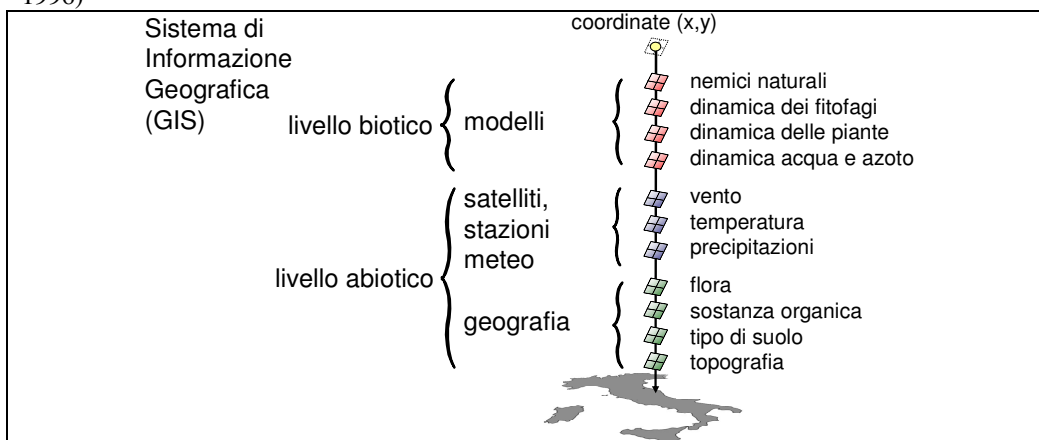
La matematica dei PBDM viene implementata mediante simulazione numerica con l'ausilio del computer (per i dettagli, si vedano i lavori citati nel paragrafo precedente). I modelli demografici in oggetto sono stati impiegati per analizzare sistemi biologici in varie parti del mondo, perché le variabili forzanti sono unicamente quelle meteorologiche e la dinamica di

nutrienti ed acqua nel terreno (vedi Gutierrez e Baumgärtner, 1984, 2007). Queste ed altre proprietà rendono le previsioni dei modelli indipendenti da tempo e spazio. Un punto di forza dei PBDM è che essi riducono il divario esistente tra i modelli puramente teorici e i troppo complicati modelli di simulazione. Essi hanno quindi non solo un'utilità pratica nell'affrontare le questioni ecologiche della realtà odierna, ma anche una valenza di studio teorico applicabile a soggetti quali la coevoluzione delle specie o la dinamica delle reti trofiche, consentendo in tal modo di approfondire la conoscenza dei meccanismi che sono alla base problemi pratici.

Integrazione di PBDM in GIS

Per analizzare gli agroecosistemi su vasta scala è necessario integrare i PBDM in un GIS. A tale scopo è stata scelta la tecnologia GIS a sorgente aperta di GRASS (Geographic Resources Analysis Support System, <http://grass.itc.it/>), un software messo a punto inizialmente dal genio militare statunitense ma che dal 1997 viene sviluppato da un network internazionale di programmatori guidato dal Dott. Markus Neteler (Fondazione Bruno Kessler, Trento; <http://www.fbk.it/>). GRASS è oggi il leader tra i GIS a sorgente aperta, viene fornito gratuitamente e contiene centinaia di moduli per l'elaborazione di dati vettoriali e raster, per la visualizzazione e per l'analisi dell'immagine. GRASS è un software modulare che facilita lo sviluppo e l'aggiunta di nuovi moduli. Questo è un grande vantaggio che unito alla filosofia del software libero e a sorgente aperta, facilita la diffusione dell'innovazione scientifica e tecnologica, rimuovendo le barriere dei diritti di proprietà sul codice a sorgente chiusa ed i relativi costi di licenza. Il GIS nel quale i PBDM sono integrati (figura 3) non è che un modulo di GRASS.

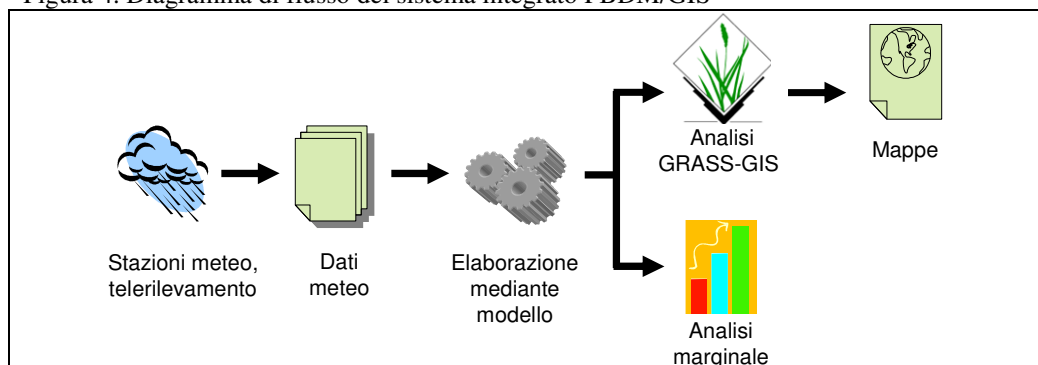
Figura 3. Rappresentazione schematica dell'integrazione dei PBDM in GIS (da Gutierrez, 1996)



Il GIS che integra i PBDM è stato sviluppato nell'ambito di uno studio realizzato presso l'Università della California a Berkeley e commissionato dal Governo della California; studio mirato ad analizzare l'effetto dei cambiamenti climatici sugli agroecosistemi californiani (Gutierrez *et al.*, 2006a). Detto GIS è collegato ai PBDM e permette di rappresentare su mappa i risultati delle simulazioni. Mediante un apposito menù dell'interfaccia grafica, si può selezionare l'area geografica d'interesse (ad esempio l'Italia, oppure una o più regioni italiane) e circoscrivere ulteriormente l'area di studio in zone ecologiche particolari o entro determinate fasce altimetriche. Le specie da includere nella simulazione e le condizioni iniziali ad esse

relative vanno indicate in un apposito file testuale di configurazione, nel quale si riportano anche data iniziale e finale delle simulazioni, intervallo temporale al quale riferire risultati e mappe, risoluzione dell'immagine ed altri fattori. Qualunque modello che risponda ai requisiti minimi di input-output può essere integrato nel GIS. Le previsioni del modello possono essere infine elaborate anche mediante metodi econometrici multivariati (analisi marginale e regressione multipla) in maniera da fornire una sintesi quantitativa che si aggiunge a quella visiva fornita dal GIS (figura 4).

Figura 4. Diagramma di flusso del sistema integrato PBDM/GIS



RISULTATI E DISCUSSIONE

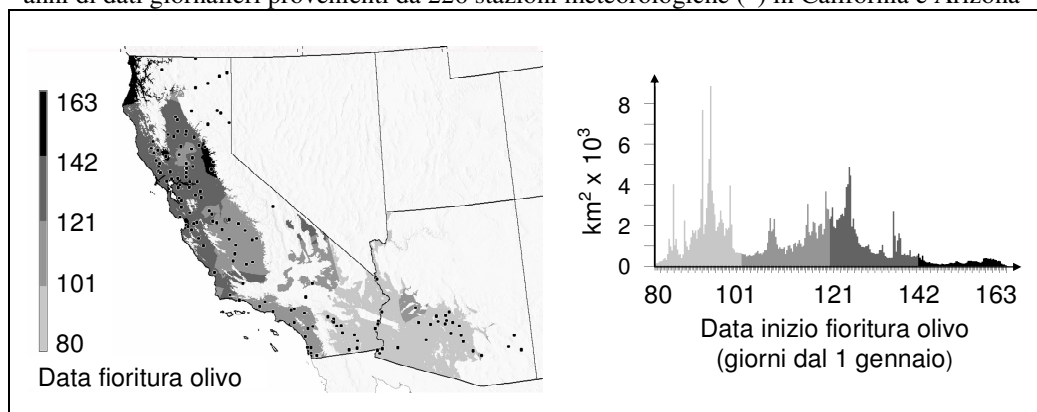
L'analisi di ecosistemi completi, per quanto semplici, risulta impossibile a causa dell'eccessivo numero di specie presenti (vedi ad es. Gilbert *et al.*, 1976). Per fortuna la maggior parte dei fitofagi presenti negli agroecosistemi è soggetta ad un buon controllo biologico naturale e/o risulta di passaggio; è pertanto opportuno concentrarsi su quelle specie che causano danni economici. Tuttavia, studiare l'impatto dei cambiamenti climatici sulle interazioni pianta-fitofago-nemici naturali rimane comunque difficile e richiede l'impiego di modelli semplificati ma realistici, capaci di esaminare sistemi complessi. Mediante modelli demografici dotati di validità generale, poiché basati sulla fisiologia e validi per tutte specie a tutti i livelli trofici, è possibile simulare gli effetti delle condizioni meteorologiche osservate e dei cambiamenti climatici sulle dinamiche tritrofiche in agroecosistemi vigneto e oliveto. Un risultato importante è la capacità di prevedere l'evoluzione sia dell'areale di coltivazione di vite e olivo, sia delle aree favorevoli allo sviluppo dei relativi fitofagi dannosi e dei nemici naturali a questi associati. Questo è particolarmente importante per colture perenni come vite e olivo, poiché, a differenza di quelle annuali, i costi di reimpianto in nuovi areali di coltivazione sono particolarmente onerosi.

L'Italia è un leader mondiale nella coltivazione di vite e olivo; colture che hanno un'importanza notevole anche dal punto di vista paesaggistico ed ecologico non solo nel resto dell'Europa ma in tutto il Bacino del Mediterraneo. Per la vite sono disponibili modelli (Gutierrez *et al.*, 1985; Wermelinger *et al.*, 1991) messi a punto (Williams *et al.*, 1985) in California e Svizzera, con relative pubblicazioni su specie esotiche di recente introduzione in California, come lo Pseudococcide *Planococcus ficus* che attualmente minaccia l'industria viticola locale (Gutierrez *et al.*, 2007) ed è la più temibile fra le cocciniglie della vite in Italia, poiché ampiamente diffusa e capace di trasmettere ampelopatie virali (Engelbrecht e Kasdorf, 1990). Sono poi in corso studi sulla cicalina *Homalodisca vitripennis*, vettore del batterio *Xylella fastidiosa* che causa la devastante malattia di Pierce nei vigneti del nord America. Un

patosistema analogo si trova in Europa, dove la cicalina *Scaphoideus titanus* è il vettore del fitoplasma che causa la Flavescenza dorata, il più grave tra i giallumi della vite (Bertin *et al.*, 2007). In Italia, detta cicalina costituisce come è noto una minaccia tanto grave da essere sottoposta a trattamenti insetticidi obbligatori, mentre i vigneti compresi in aree considerate “focolaio” sono soggetti ad estirpazione obbligatoria in presenza di sintomi sospetti di Flavescence dorée, anche senza analisi di conferma. Sono disponibili PBDM anche per la cicalina della vite *Empoasca vitis* e per il suo parassitoide *Anagrus atomus* (Cerutti *et al.*, 1991), nonché per il ragnetto rosso *Panonychus ulmi* (Wermelinger *et al.*, 1992) e per la tignoletta della vite *Lobesia botrana* (Cossu *et al.*, 1999). Inoltre, nel corso di uno studio riguardante gli effetti dei cambiamenti climatici sugli agroecosistemi californiani, sono stati sviluppati modelli sia per l’olivo sia per la mosca dell’olivo *Bactrocera oleae* (Gutierrez *et al.*, 2006a), fitofago chiave anche negli oliveti del Bacino del Mediterraneo. Così, sulla base dell’esperienza californiana e di un modello di *B. oleae* messo a punto in Italia (Cossu *et al.*, 1999), è stata condotta un’analisi dei sistemi oliveto italiani e statunitensi sottoposti a cambiamenti climatici (Gutierrez *et al.*, submitted).

Per rappresentare su mappa le previsioni dei modelli nelle diverse zone ecologiche italiane, viene utilizzata l’avanzata tecnologia GIS a sorgente aperta di GRASS (figura 5). Il sistema integrato EM/GIS raccoglie le conoscenze attuali sugli agroecosistemi e può essere esteso ad altri sistemi, aggiornato con nuove conoscenze ed utilizzato per guidare la ricerca multidisciplinare su scala locale, regionale e nazionale. I risultati delle simulazioni possono inoltre essere analizzati mediante analisi marginale e modelli di regressione multipla, al fine di studiare le interazioni biotiche in relazione alle condizioni meteorologiche. Grazie all’analisi multivariata, le previsioni dei modelli si possono considerare indipendenti da tempo e spazio e costituiscono una base solida e flessibile per gestire vigneto ed oliveto in un ambiente globale mutevole.

Figura 5. Esempio di visualizzazione del sistema integrato PBDM/GIS: media ottenuta su 11 anni di dati giornalieri provenienti da 226 stazioni meteorologiche (●) in California e Arizona



Attualmente i limiti applicativi del sistema integrato PBDM/GIS sono costituiti dalla disponibilità dei dati biologici e meteorologici necessari al suo funzionamento, e quindi dalle infrastrutture che raccolgono i dati stessi. I costi che andrebbero sostenuti per migliorare dette infrastrutture sono relativamente contenuti, mentre i benefici che se ne ricaverebbero sono davvero ampi. Con una maggiore disponibilità di dati, i modelli con base fisiologica sarebbero un eccellente strumento d’indagine per rispondere a diverse questioni aperte riguardo

l'impatto dei cambiamenti climatici su agroecosistemi mediterranei perenni come vite e olivo; ad esempio:

- Quale sarà l'effetto dei cambiamenti climatici sulla dinamica dei fitofagi su vasta scala (ad esempio in Italia)?
- Come cambieranno distribuzione ed abbondanza di specie fitofaghe e non in relazione alle variazioni di temperatura e/o precipitazioni dovute ai cambiamenti climatici?
- Le pullulazioni di fitofagi saranno più frequenti e prolungate?

CONCLUSIONI

Stabilire l'impatto dei cambiamenti climatici su sistemi tritrofici è un compito del quale generalmente si riconoscono importanza e difficoltà. Nondimeno, il presente contributo suggerisce che i modelli demografici realistici basati sulla fisiologia possono semplificare il problema. Non è che un'ulteriore conferma della necessità di investire maggiori risorse nello sviluppo di modelli predittivi (Clark *et al.*, 2001). L'approccio integrato PBDM/GIS offre diversi vantaggi: (a) costituisce una collezione delle conoscenze disponibili sugli agroecosistemi; (b) può essere aggiornato con nuove informazioni man mano che si rendono disponibili, grazie ad una struttura modulare; (c) è utile per guidare la ricerca multidisciplinare (agronomia, entomologia, patologia, economia, teoria ecologica, ecc.) poiché integra discipline biologiche diverse e produce una sintesi di fenomeni biologici complessi facilmente comprensibile da economisti (Regev *et al.*, 1998; Gutierrez e Regev, 2005) ed altri specialisti non perfettamente in sintonia con le sfumature dell'ecologia del campo coltivato o della fisiologia vegetale (DeVay *et al.*, 1997).

LAVORI CITATI

- Andrewartha H.G., Birch L.C., 1954. The Distribution and Abundance of Animals. The University of Chicago Press, Chicago.
- Baumgärtner J., Gilioli G., Tikubet G., Gutierrez A.P., 2007. Eco-social analysis of an East African agro-pastoral system: management of tsetse and bovine trypanosomiasis. *Ecol. Econ.* (in press), DOI:10.1016/j.ecolecon.2007.06.005.
- Bertin S., Guglielmino C., Karam N., Gomulski L., Malacrida A., Gasperi G., 2007. Diffusion of the Nearctic leafhopper *Scaphoideus titanus* Ball in Europe: a consequence of human trading activity. *Genetica* Online first, doi: 10.1007/s10709-006-9137-y.
- Cerutti F., Baumgärtner J., Delucchi V., 1991. The dynamics of the grape leafhopper *Empoasca vitis* Göthe populations in southern Switzerland and the implications for habitat management. *Biocontrol Science and Technology*, 1, 177-194.
- Clark J.S., Carpenter S.R., Barber M., Collins S., Dobson A., Foley J.A., Lodge D.M., Pascual M., Pielke R. Jr., Pizer W., Pringle C., Reid W.V., Rose K.A., Sala O., Schlesinger W.H., Wall D.H., Wear D., 2001. Ecological forecasts: an emerging imperative. *Science*, 293, 657-660.
- Cossu Q.A., Delrio G., Di Cola G., Gilioli G., 1999. Modelli matematici nella protezione integrata delle colture in Sardegna. Servizio Agrometeorologico Regionale per la Sardegna, Sassari.
- DeVay J.E., Gutierrez A.P., Pullman G.S., Wakeman R.J., Garber R.H., Jeffers D.P., Smith S.N., Goodell P.B., Roberts P.A., 1997. Inoculum densities of *Fusarium oxysporum* f.sp. *vasinfectum* and *Meloidogyne incognita* in relation to the development of *Fusarium* wilt and the phenology of cotton plants (*Gossypium hirsutum*). *Phytopathology*, 87, 341-346.

- Engelbrecht D.J., Kasdorf G.G.F. 1990. Transmission of grapevine leafroll disease and associated closteroviruses by the vine mealybug *Planococcus ficus*. *Phytophylactica*, 22, 341-346.
- Gilbert N., Gutierrez A.P., Frazer B.D., Jones R.E., 1976. Ecological relationships. Freeman and Co., New York.
- Giorgi F., Lionello P., 2007. Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change*, DOI:10.1016/j.gloplacha.2007.09.005.
- Gutierrez A.P., 1992. The physiological basis of ratio dependent theory. *Ecology*, 73, 1552-63.
- Gutierrez A.P., 1996. Applied population ecology: a supply-demand approach. John Wiley and Sons, New York, USA.
- Gutierrez A.P., Baumgärtner J.U., 1984. Multitrophic level models of predator-prey energetics: I. Age-specific energetics models-pea aphid *Acyrtosiphon pisum* (Homoptera: Aphididae) as an example. *Can. Entomol.*, 116, 924-932.
- Gutierrez A.P., Regev U., 2005. The bioeconomics of tritrophic systems: applications to invasive species. *Ecol. Econ.*, 52, 383.
- Gutierrez A.P., Ponsard S., 2006. Physiologically based demographics of Bt cotton-pest interactions: I. Pink bollworm resistance, refuge and risk. *Ecol. Model.*, 191, 346-359.
- Gutierrez A.P., Baumgärtner J.U., 2007. Modeling the dynamics of tritrophic population interactions, *In: M. Kogan and P. Jepson, eds. Perspectives in ecological theory and integrated pest management.* Cambridge University Press.
- Gutierrez A.P., Williams D.W., Kido H., 1985. A model of grape growth and development: the mathematical structure and biological considerations. *Crop Science*, 25, 721-728.
- Gutierrez A.P., Ponti L., Cossu Q.A., (in press.) Potential effects of climate change on Olive and olive fly (*Bactrocera oleae* (Gmelin)): Arizona-California and Italy. *J. Appl. Ecol.*
- Gutierrez A.P., Ponti L., Ellis C.K., d'Oultremont T., 2006a. Analysis of climate effects on agricultural systems. Report from California Climate Change Center, publication # CEC-500-2005-188-SF, <http://www.energy.ca.gov/2005publications/CEC-500-2005-188/CEC-500-2005-188-SF.PDF>.
- Gutierrez A.P., d'Oultremont T., Ellis C.K., Ponti L., 2006b. Climatic limits of pink bollworm in Arizona and California: effects of climate warming. *Acta Oecol.*, 30, 353-364.
- Gutierrez A.P., Falcon L.A., Loew W., Leipzig P.A., van-den Bosch R., 1975. An analysis of cotton production in California: a model for acala cotton and the effects of defoliators on its yields. *Environ. Entomol.*, 4, 125-136.
- Gutierrez A.P., Daane K.M., Ponti L., Walton V.M., Ellis C.K., 2007. Prospective evaluation of the biological control of vine mealybug: refuge effects and climate. *Journal of Applied Ecology* (in press), DOI 10.1111/j.1365-2664.2007.01356.x.
- Iannetta M., 2006. La desertificazione in Italia e il progetto RIADE. ENEA, Roma.
- Regev U., Gutierrez A.P., Schreiber S.J., Zilberman D., 1998. Biological and economic foundations of renewable resource exploitation. *Ecol. Econ.*, 26, 227-242.
- Wermelinger B., Baumgärtner J., Gutierrez A.P., 1991. A demographic model of assimilation and allocation of carbon and nitrogen in grapevines. *Ecol. Model.*, 53, 1-26.
- Wermelinger B., Candolfi M.P., Baumgärtner J., 1992. A model of the European red mite (Acari, Tetranychidae) population dynamics and its linkage to grapevine growth and development. *Journal of Applied Entomology*, 114, 155-166.
- Williams D.W., Williams W.W., Barnett K.M., Kelley K.M., McKernry M.V., 1985. Validation of a model for the growth and development of the Thompson Seedless grapevine. I. Vegetative growth and fruit yield. *American Journal of Enology and Viticulture*, 36, 275-289.