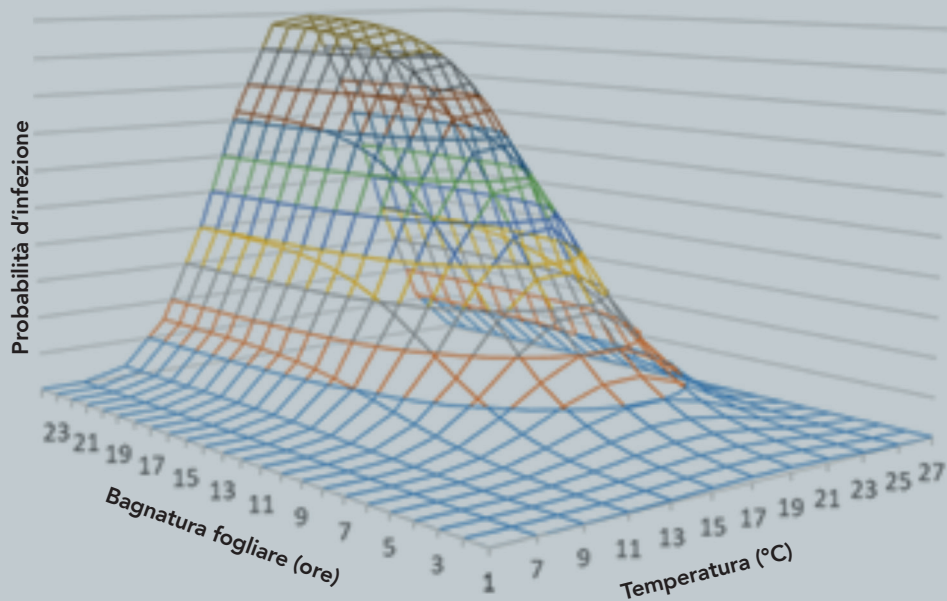


DINAMICA DI POPOLAZIONE E MODELLISTICA PER GLI ORGANISMI DANNOSI IN AGRICOLTURA

Dall'analisi dei sistemi
alla correlazione dei dati



**DINAMICA DI POPOLAZIONE
E MODELLISTICA
PER GLI ORGANISMI
DANNOSI IN AGRICOLTURA**

**Dall'analisi dei sistemi
alla correlazione dei dati**

Pubblicazione realizzata nell'ambito dell'Azione 4 "Formazione ed aggiornamento tecnici" del "Piano regionale per il contrasto alla diffusione di insetti alloctoni dannosi alla frutticoltura. DGRV n. 611 del 19.05.20".

Coordinamento generale

Veneto Agricoltura – Agenzia veneta per l'innovazione del settore primario
Lorenzo Furlan - Gaddo Cavenago Bignami

Coordinamento editoriale

Gaddo Cavenago Bignami

Dirigente responsabile

Lorenzo Furlan

Autore della pubblicazione

Paolo Racca

Impostazione grafica

JDW di Calderaro Danilo

Fotografie, schemi e grafici

Paolo Racca

Pubblicazione edita da

Veneto Agricoltura – Agenzia Veneta per l'Innovazione del Settore Primario
Viale dell'Università, 14 – 35020 Legnaro (PD) – Tel. 49 8293711
e-mail: info@venetoagricoltura.org – www.venetoagricoltura.org

È consentita la riproduzione di testi, foto, disegni, ecc. previa autorizzazione da parte di Veneto Agricoltura citando gli estremi della pubblicazione

La pubblicazione è disponibile on-line sul sito di Veneto Agricoltura: <https://www.venetoagricoltura.org/argomento/pubblicazioni/> e può essere approfondita con le lezioni del Corso sulla "Dinamica di popolazione e modellistica per gli organismi dannosi in agricoltura" tenutosi dallo stesso Autore del manuale, collegandosi al link https://www.youtube.com/playlist?list=PL6OhujJ_UTsVCEVQ42TTI4wnu3fZ242Xc



<https://www.venetoagricoltura.org/argomento/pubblicazioni/>



https://www.youtube.com/playlist?list=PL6OhujJ_UTsVCEVQ42TTI4wnu3fZ242Xc

DINAMICA DI POPOLAZIONE E MODELLISTICA PER GLI ORGANISMI DANNOSI IN AGRICOLTURA

**Dall'analisi dei sistemi
alla correlazione dei dati**

Indice

Prefazione	7
Presentazione	8
Premessa	9
Introduzione	10
Capitolo I	12
Le malattie e i parassiti delle piante coltivate e il “triangolo della malattia”	
Capitolo II	15
Ecosistemi ed Agrosistemi	
Capitolo III	17
La difesa integrata	
Capitolo IV	19
Modelli di simulazione e Sistemi di Supporto alle Decisioni (DSS - Decision Support System)	
Capitolo V	22
Le fasi della realizzazione di un modello di simulazione	
Capitolo VI	31
L'analisi di sistema e il diagramma di flusso per i fitofagi	
Capitolo VII	34
Il concetto del Tempo cronologico e del tempo fisiologico	
Capitolo VIII	35
Alcuni concetti di Statistica essenziale	
Capitolo IX	37
Correlazioni tra i dati e la regressione lineare semplice	
Capitolo X	39
Correlazioni tra i dati e la regressione non lineare	
Capitolo XI	43
Correlazioni tra i dati con curve “a campana”	
Capitolo XII	46
Correlazione a più variabili	
Epilogo	50
Autore	51

Prefazione

La progressiva diffusione della Cimice asiatica (*Halyomorpha halys*) e di altri insetti alloctoni nel territorio regionale che hanno recato ingenti danni a tutte le colture, ma in particolare al comparto della frutticoltura, ha spinto la Regione del Veneto con la DGRV n. 611 del 19 maggio 2020 ad approvare il “Piano per il contrasto alla diffusione di insetti alloctoni dannosi alla frutticoltura”.

Il “Piano per il contrasto alla diffusione di insetti alloctoni dannosi alla frutticoltura” ha compreso una serie di Azioni il cui scopo è stato quello di individuare misure idonee a contrastare la diffusione della cimice asiatica e di altri insetti alloctoni dannosi alla frutticoltura con diverse attività di ricerca di insetti antagonisti e loro sperimentazione sul territorio; con la costituzione di una rete permanente di scambio di informazione e formazione degli operatori agricoli e la costituzione di strumenti finanziari flessibili per il sostegno dei rischi dell’impresa danneggiata.

Il Manuale è stato realizzato nell’ambito di questo Piano e ci trasmette l’importanza del concetto di “dinamica di popolazione” e come l’utilizzo di modelli matematici e informatici servono a comprendere, simulare e prevedere vari aspetti dell’agricoltura al fine di prevenire le malattie e i parassiti delle colture.

Presentazione

Le nuove emergenze fitosanitarie che l'agricoltura oggi deve affrontare, richiedono non solo la conoscenza della biologia di tali avversità, ma anche la capacità di gestire tecniche di monitoraggio e previsione delle infestazioni/infezioni, di definire soglie di danno e di orientare gli interventi di difesa che l'impresa agricola deve adottare.

Questo manuale ci offre un'importante opportunità di acquisire le conoscenze di base al fine di saper interpretare i dati e la loro organizzazione per la definizione di modelli previsionali.

Premessa

Caro Lettore,

Una famosa citazione di un discorso di Confucio fatta da un filosofo e insegnante cinese di nome Kong Fuzi, vissuto nel periodo della Dinastia Zhou tradotta in italiano recita: "Se il lavoro è passione, non avrai lavorato un solo giorno della tua vita". È una parafrasi moderna che esprime l'idea che se fai ciò che ami, il tuo lavoro non sembrerà mai un peso e non avrai la sensazione di aver trascorso il tempo lavorando. In sostanza, suggerisce che quando la passione guida il tuo lavoro, ogni giorno diventa gratificante e significativo.

l'opuscolo che hai tra le mani e che, forse, ti accingi a leggere non ha alcuna pretesa di essere esaustivo nei confronti di un tema molto vasto e reso complicato da un'estrema multi- e inter- disciplinarità che passa dalla matematica e statistica, si interseca con l'agronomia e la meteorologia, con la fitopatologia e l'entomologia, con la biologia e la fisiologia, arrivando a descrivere fenomeni complessi di descrizione e calcolo dell'andamento delle malattie fungine (epidemiologia) e delle relazioni tra gli individui di una popolazione di fitofagi (dinamica di popolazione) e le piante coltivate.

Il suo scopo è semplicemente quello di aprire una porta su questo mondo e di suscitare curiosità, e magari "appassionarti" all'argomento. Tale curiosità potrà essere soddisfatta andando poi ad approfondire ciò che vorrai sui "sacri testi" che, qua e là, ti verranno indicati. Dunque non mi resta che augurarti "buona lettura".

Introduzione

La modellistica per l'agricoltura è un approccio scientifico che utilizza modelli matematici e informatici per comprendere, simulare e prevedere vari aspetti dell'agricoltura, comprese le dinamiche delle coltivazioni, le reazioni delle piante agli stress ambientali e, in particolare, alle malattie e i parassiti.

Alcuni aspetti chiave della modellistica per l'agricoltura, con riferimento particolare alle malattie e ai parassiti delle piante possono essere così riassunti:

- **Modelli di diffusione delle malattie e dei parassiti:** questi modelli cercano di prevedere come le malattie e i parassiti si diffonderanno, considerano fattori come le condizioni meteorologiche, le pratiche agricole, le varietà delle colture e altri parametri per stimare il rischio e sviluppare strategie di gestione.
- **Modelli di dinamica delle popolazioni:** questi modelli studiano come le popolazioni di parassiti o patogeni cambiano nel tempo. Possono prevedere quando e in quale intensità relativa si verificheranno infestazioni e fornire indicazioni su quando applicare trattamenti come pesticidi o fungicidi.
- **Modelli di previsione delle condizioni ambientali:** le condizioni meteorologiche influenzano la diffusione delle malattie e dei parassiti. I modelli climatici possono essere integrati nei modelli agricoli per prevedere quando le condizioni saranno favorevoli per l'insorgenza di malattie o parassiti specifici.
- **Modelli gestionali:** consentono agli agricoltori di esplorare diverse strategie di gestione, come il momento ideale per la semina, l'irrigazione o l'applicazione di trattamenti, al fine di massimizzare la resa delle coltivazioni e minimizzare le perdite dovute a malattie e parassiti.

L'epidemiologia nel settore agricolo (anche chiamata epidemiologia bota-

nica) si occupa delle relazioni tra le malattie delle piante e le piante stesse, in particolare cerca di capire come queste si diffondano e influenzino le rese produttive analizzando modelli di diffusione e identificando fattori di rischio potenziali.

La dinamica di popolazione riguarda la “demografia” delle comunità dei fitofagi in particolare studia come le popolazioni cambiano nel tempo attraverso nascite, morti, migrazioni e altre dinamiche.

L'epidemiologo è come un “investigatore” che cerca di risolvere il mistero di come un'epidemia si sia diffusa, mentre chi si occupa di dinamica di popolazione è come un “cronista” che racconta la storia della crescita o del declino di una popolazione nel corso della stagione. Due campi affascinanti che si intrecciano per dipingere un quadro completo della sanità di una coltura.

La modellistica può e deve essere combinata con tecnologie di monitoraggio in tempo reale, come osservazioni vive, ma anche con l'uso di sensori nel campo, droni e satelliti, per raccogliere dati e migliorare la precisione delle previsioni e delle decisioni.

PER APPROFONDIRE

Zhai, Z., Martínez, J. F., Beltran, V., & Martínez, N. L. (2020). Decision support systems for agriculture 4.0: Survey and challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*, 170, 105256.

Racca, P., Zeuner, T., Jung, J., Kleinhenz, B. (2010). Model Validation and Use of Geographic Information Systems in Crop Protection Warning Service. In: Oerke, EC., Gerhards, R., Menz, G., Sikora, R. (eds) *Precision Crop Protection - the Challenge and Use of Heterogeneity*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9277-9_16

Teng, P. S. (1985) A comparison of simulation approaches to epidemic modeling. *Annual Review of Phytopathology*, 1985, 23.1: 351-379.

CAPITOLO I

Le malattie e i parassiti delle piante coltivate e il “triangolo della malattia”

La FAO stima che ogni anno fino al 40 per cento della produzione agricola globale viene perso a causa dei parassiti. Ogni anno, le malattie delle piante costano all'economia globale oltre 220 miliardi di dollari e gli insetti invasivi almeno 70 miliardi di dollari (fonte FAOSTAT 2021).

Ma cos'è una malattia? Il vocabolario Treccani definisce una malattia come la “condizione anormale e insolita di un organismo vivente, animale o vegetale, caratterizzata da disturbi funzionali, da alterazioni o lesioni - osservabili o presumibili, locali o generali”.

L'epidemiologia e la dinamica di popolazione interessano soprattutto due grandi gruppi di organismi dannosi: i funghi e gli insetti. Vediamo alcune delle loro caratteristiche principali.

FUNGHI PATOGENI

Chi sono: I funghi patogeni delle piante sono organismi microscopici appartenenti al regno dei funghi. Questi includono vari generi come *Fusarium*, *Phytophthora* e *Alternaria*.

Cosa fanno: I funghi patogeni delle piante causano malattie dannose alle coltivazioni, compromettendo

la crescita e la produttività delle piante coltivate.

Come agiscono: Questi funghi possono penetrare nelle piante attraverso lesioni o radici, rilasciando enzimi e tossine che danneggiano i tessuti vegetali. Possono diffondersi attraverso spore, acqua di irrorazione o su utensili agricoli contaminati.

Dove si trovano: I funghi patogeni delle piante sono diffusi in tutto il mondo, presenti nel suolo, nell'acqua e nell'aria. Si sviluppano in condizioni favorevoli come temperature moderate e umidità.

Quando colpiscono: Le infezioni fungine possono verificarsi in qualsiasi momento durante la crescita delle piante, ma sono spesso più comuni in condizioni di elevata umidità e temperature moderate.

Perché sono dannosi: I funghi patogeni delle piante causano danni economici significativi alle coltivazioni, compromettendo la qualità e la quantità del raccolto. Possono portare alla perdita di intere colture e richiedono un controllo attento per prevenirne la diffusione.

INSETTI

Chi sono: Gli insetti dannosi all'agricoltura sono spesso costituiti da varie specie, tra cui afidi, coleotteri e lepidotteri.

Cosa fanno: Questi insetti danneggiano le colture agricole nutrendosi di foglie, fiori o radici delle piante, compromettendo la crescita e la resa dei raccolti.

Come agiscono: Utilizzano apparati boccali perforanti-succhianti per estrarre nutrienti dalle piante, in alcuni casi trasmettendo anche malattie vegetali.

Dove si trovano: Possono essere presenti in vari ambienti agricoli, dai campi alle serre, a seconda delle specie e delle colture coinvolte.

Quando colpiscono: L'attività dannosa degli insetti può variare a seconda delle stagioni e delle condizioni climatiche, con alcune specie più attive in determinati periodi dell'anno.

Perché sono dannosi: Gli insetti dannosi all'agricoltura rappresentano una minaccia perché possono causare significative perdite di raccolto, compromettendo la produzione alimentare e l'economia agricola.

Le interazioni tra la pianta e i suoi organismi patogeni sono descritte dal "triangolo della malattia".

Il "triangolo della malattia" è un concetto fondamentale nell'ambito dell'agricoltura e della fitopatologia che rappresenta i tre fattori chiave necessari per lo sviluppo di una malattia nelle coltivazioni. Questi tre fattori sono:

L'agente patogeno che rappresenta l'organismo o il microrganismo che causa la malattia. Può essere un batterio, un fungo, un virus, un nematode o qualsiasi altro organismo che infetta le piante. L'agente patogeno è responsabile della diffusione dell'infezione.

L'ospite che rappresenta la pianta coltivata o l'organismo vegetale che può essere infettato. L'ospite fornisce il substrato in cui l'agente

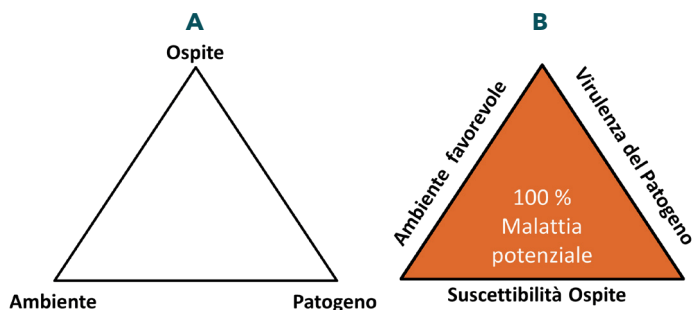


Figura 1. Il triangolo della malattia con le relazioni tra ospite, patogeno e ambiente (A) e il potenziale della malattia (B)

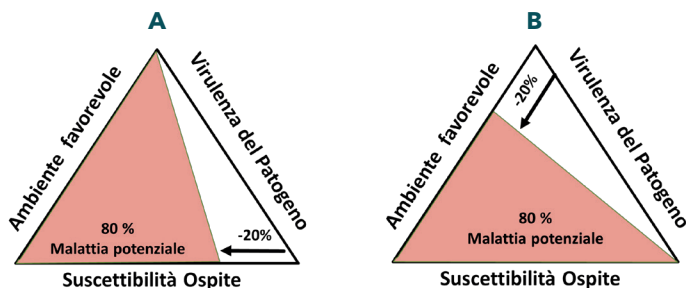


Figura 2. Il triangolo della malattia con la riduzione del potenziale di malattia agendo sulla suscettibilità dell'ospite (A) e sull'ambiente (B)

patogeno può prosperare e causare danni.

L'ambiente che rappresenta le condizioni ambientali e climatiche che influenzano la dinamica della malattia. Le condizioni ambientali, come temperatura, umidità, pH del suolo e disponibilità di acqua, possono influire sulla capacità dell'agente patogeno di infettare l'ospite e causare danni.

Il triangolo lega dunque tra di loro le relazioni tra ospite, patogeno e ambiente (Fig 1 A).

Ponendo come lati di questo triangolo l'ambiente, la virulenza del patogeno e la suscettibilità dell'ospite, l'area del triangolo rappresenterà il potenziale della malattia che sarà pari al 100% quando il patogeno è virulento, l'ospite è suscettibile e l'ambiente è favorevole.

Possiamo ridurre il potenziale della malattia agendo sui lati del triangolo, in particolare possiamo ridurre la suscettibilità dell'ospite con l'uso di cultivar resistenti (Fig. 2 A) oppure agire sulle condizioni ambientali, ad. Es diminuendo l'umidità all'interno

di una serra (Fig.2 B).

Il triangolo della malattia, inoltre, indica che la malattia si verifica, ovviamente, solo nel caso in cui le tre componenti si vengono a trovare nello stesso luogo contemporaneamente.

PER APPROFONDIRE

Agrios, G. N. (2005). Plant pathology. Elsevier.

Ainsworth G. C. (1981), Introduction to the History of Plant Pathology, Cambridge University Press, Cambridge 1981

Baldacci Elio, (1984) Teoria e pratica negli studi fitopatologici del sec. XIX, in Rivista di storia dell'agricoltura, n. 2, dic. 1984

Matta A. (1996) Fondamenti di patologia vegetale. Patron Editore - Collana: Scienza e tecniche delle produzioni vegetali. Pagine: 496

CAPITOLO II

Ecosistemi ed Agrosistemi

Un ecosistema, un agrosistema e un agroecosistema sono tre concetti legati alla comprensione delle interazioni tra organismi viventi e il loro ambiente, ma si differenziano per la loro struttura, funzione e scopo.

ECOSISTEMA

Un ecosistema è un sistema biologico composto da tutti gli organismi viventi (biocenosi) in una determinata area e dall'ambiente fisico (biotopo) in cui vivono e interagiscono. Gli ecosistemi possono variare notevolmente in dimensioni, complessità e caratteristiche, da foreste pluviali tropicali a deserti aridi.

Gli ecosistemi sono autosufficienti, con cicli biogeochimici che permettono la circolazione di energia e sostanze nutritive tra i vari organismi.

AGROSISTEMA

Un agrosistema è, sostanzialmente, un ecosistema utilizzato per la

produzione agricola, come campi coltivati, pascoli o piantagioni. Gli agrosistemi sono modificati dall'attività umana e sono progettati per la produzione di alimenti, fibre o altri prodotti agricoli.

Gli agrosistemi sono altamente manipolati dall'uomo e spesso comportano l'uso di tecniche agricole intensive come l'irrigazione, la fertilizzazione e il controllo delle erbe infestanti e delle malattie. Possono differire notevolmente in base alle colture coltivate, alla gestione e all'ubicazione geografica.

AGROECOSISTEMA

Un agroecosistema è un sistema agricolo che tiene conto delle interazioni ecologiche tra le piante coltivate, gli animali, l'ambiente circostante e l'agricoltore. Si concentra sulla sostenibilità a lungo termine dell'agricoltura, cercando di minimizzare l'impatto negativo sull'ambiente.

Mentre un ecosistema è un sistema naturale che esiste indipendentemente dall'intervento umano, un agrosistema è un sistema agricolo altamente manipolato dall'uomo per scopi di produzione, e un agroecosistema è un tipo specifico di agrosistema che cerca di incorporare principi ecologici per ridurre l'impatto ambientale e promuovere la sostenibilità agricola.

Gli agroecosistemi promuovono pratiche agricole più sostenibili, come la coltivazione biologica, la rotazione delle colture, l'uso di concimi organici e la conservazione delle risorse idriche. L'obiettivo è creare un sistema in cui la produzione agricola sia integrata nell'ecosistema circostante senza danneggiarne la stabilità.

PER APPROFONDIRE

Garbach, K., Milder, J. C., Montenegro, M., Karp, D. S., & DeClerck, F. A. J. (2014). Biodiversity and ecosystem services in agroecosystems. *Encyclopedia of agriculture and food systems*, 2, 21-40.

CAPITOLO III

La difesa integrata

Ogni mezzo di lotta può essere più o meno efficace a seconda della malattia da combattere e/o delle particolari circostanze in cui ci si trova ad operare.

D'altro canto, nessun tipo di intervento è in grado di fornire, da solo, risultati sufficienti o soddisfacenti.

Queste sono le premesse per introdurre il concetto di difesa integrata inteso come: "sistema di regolazione delle malattie che utilizza tutte le tecniche ed i metodi appropriati nel modo più compatibile e mantiene le malattie a livelli in cui esse non causano danni economici.

La difesa integrata inizia ancora prima che la coltura sia presente in campo, bisogna conoscere l'ambiente e quindi quali siano le malattie più frequenti e quali sono i livelli di danno nella zona di coltivazione. A tale riguardo si può ricorrere ad apposite carte di rischio di malattia ottenute con metodi geofitopatologici e geostatistici.

Il secondo passo da compiere è la scelta della cultivar che deve essere fatta in base alle caratteristiche produttive, ma anche a quelle di resistenza alle malattie. In questo caso risulta utile consultare le liste di raccomandazione varietale stilate da

associazioni di produttori o da enti pubblici.

Successivamente è necessario scegliere le tecniche colturali migliori in modo rendere l'ambiente il più favorevole possibile alla crescita della coltura e, nello stesso tempo, sfavorevole allo sviluppo del patogeno. Ad esempio, nel caso di molte piante arboree, determinate forme di allevamento che prevedono un forte sviluppo della chioma fanno sì che si crei all'interno della stessa un microclima ad elevata umidità relativa favorevole allo sviluppo di molti parassiti fungini. Lo stesso discorso può valere nel caso di piante erbacee per la densità di semina.

Conosciuto l'ambiente di coltivazione, scelta una cultivar con buone caratteristiche di resistenza e di produttività, occorre pianificare la difesa e quindi:

- controllare l'andamento meteorologico;
- utilizzare i modelli di simulazione disponibili;
- controllare la comparsa in campo delle malattie;
- controllare le soglie per i trattamenti (Schema 1).

L'abbinamento e l'informatizzazione di tutte le informazioni disponibili

(carte di rischio, modelli di simulazione, liste varietali, tecniche colturali, soglie, ecc.) porta alla realizzazio-

ne di sistemi esperti o, meglio, DSS (Decision Support System) o sistemi di supporto alle decisioni.

SCHEMA 1

Soglia economica di danno nella difesa integrata

Esiste un livello di malattia in grado di essere sopportato biologicamente dalla pianta e tale da non compromettere la produzione, tale livello è definito "soglia di tolleranza".

In termini economici si può parlare invece di "soglia economica" cioè il punto oltrepassato il quale il livello di malattia porta ad una significativa perdita di produzione e quindi il costo del trattamento è giustificato da un beneficio finale.

In termini di difesa si parla di "soglia di intervento", ossia il punto in cui è necessario intervenire con un trattamento chimico per limitare la possibile perdita di produzione.

Inoltre occorre ricordare che il danno produttivo, e quindi economico, causato da una malattia varia in rapporto all'epoca di comparsa, al tipo di sviluppo e dall'intensità delle infezioni, in relazione alla fase di sviluppo della coltura ed agli organi colpiti.

CAPITOLO IV

Modelli di simulazione e Sistemi di Supporto alle Decisioni (DSS – Decision Support System)

Una simulazione è “l’imitazione” delle operazioni eseguite nel tempo da un sistema o processo reale.

In qualsiasi modo si esegue (a mano o utilizzando un computer), la simulazione prevede la generazione di una “storia artificiale” del sistema da analizzare e l’osservazione di questa storia artificiale per tracciare informazioni riguardanti le caratteristiche operative del sistema stesso. In altre parole il comportamento di un sistema mentre evolve nel tempo si studia sviluppando un Modello di Simulazione.

I modelli di simulazione si possono classificare in base a diversi criteri:

- modelli continui, in cui le variabili variano con continuità
- modelli discreti, in cui il valore delle variabili cambia in ben definiti istanti di tempo
- modelli statici, che rappresentano un sistema in un particolare istante di tempo
- modelli dinamici, che rappresentano un sistema in evoluzione nel tempo
- modelli deterministici, che non contengono componenti probabilistici
- modelli stocastici, che presentano elementi soggetti ad aleatorietà

Come detto precedentemente il concetto di difesa integrata viene inteso come sistema di regolazione delle malattie che utilizza tutte le tecniche ed i metodi appropriati nel modo più compatibile e mantiene le malattie a livelli in cui esse non causano danni economici, presuppone l’applicazione e la sinergia di strumenti diversi.

Il punto di partenza è sicuramente la conoscenza della zona agricola in cui si opera, quindi la vocazionalità, le condizioni meteorologiche, le caratteristiche geofisiche del terreno, i parassiti e le malattie presenti ed il loro grado di dannosità, la pianificazione della lotta chimica nel rispetto della produzione, ma anche dell’ambiente.

Strumenti di valido aiuto per le scelte da effettuare ancora prima che la coltura sia in atto sono le liste varietali in cui vengono indicate cultivar con caratteristiche idonee, sia dal punto di vista produttivo che qualitativo, ad una determinata zona; le carte di rischio di malattia; i modelli di simulazione per la comparsa e l’andamento epidemico di molte malattie; i modelli di crescita e sviluppo della coltura e di effetto ed efficacia dei trattamenti antiparassitari.

L'abbinamento e l'informatizzazione di queste conoscenze ha portato alla realizzazione di software nel campo specifico della patologia vegetale con riguardo proprio alla definizione ed applicazione della lotta integrata, tali software si chiamano DSS, ovvero Decision Support System.

I DSS, letteralmente sistemi di supporto alle decisioni, seguono la struttura classica del sistema esperto, ovvero, sono programmi realizzati con lo scopo di emulare il ragionamento formale che un esperto umano compie per risolvere problemi in una specifica area di conoscenza.

Le tre componenti principali del sistema esperto sono:

1. base di conoscenza (in cui viene formalizzata la conoscenza specifica);
2. motore inferenziale (che agisce sulla base di conoscenza);
3. interfaccia (interazione con l'utente).

La realizzazione di un DSS segue un approccio procedurale ossia si definisce un algoritmo ed una sequenza di istruzioni atte a risolvere il problema.

Tali istruzioni eseguite in modo sequenziale danno il risultato all'interrogazione, quindi variando il dato di ingresso si possono avere output diversi.

In genere i DSS rivolti all'impostazione di programmi di difesa integrata sono di questo tipo e sono composti da banche dati, che formano la base di conoscenza del sistema esperto, interlacciate da modelli matematici che riproducono, in forma previsionale, l'andamento del fenomeno osservabile in campo.

L'input può variare dalla richiesta di consigli sulle varietà o cultivar da seminare, all'immissione di dati meteorologici per le simulazioni (di crescita della coltura, di andamento di malattia, di effetto di un trattamento, ecc.).

L'output è espresso sotto forma di consiglio o avvertimento, oppure come piano completo simulato di difesa integrata. L'obiettivo principale di un sistema di supporto alle decisioni per i trattamenti a difesa delle piante è migliorare la precisione e l'efficacia delle decisioni agricole, contribuendo così a ridurre la dipendenza dagli input chimici e a promuovere una gestione sostenibile delle coltivazioni. Questi sistemi sono particolarmente utili per l'agricoltura di precisione, in cui l'obiettivo è massimizzare la resa delle colture minimizzando l'uso di risorse.

Da alcuni anni gli studi epidemiologici in patologia vegetale, ossia lo studio delle interazioni tra la pianta, l'agente della malattia e l'ambiente circostante, permettono di stabilire gli effetti del patogeno sulla produzione in relazione allo stadio vegetativo della pianta e, successivamente, il vantaggio che può derivare da eventuali interventi di difesa.

Il sistema può essere suddiviso in due sottosistemi, la popolazione del patogeno e quella dell'ospite. La suddivisione può ancora continuare per arrivare a livelli ancora più specifici tipo le fasi vegetative dell'ospite e le fasi di sviluppo del patogeno, analizzando poi gli effetti sul sistema di alcune variabili ambientali come temperatura, pioggia e umidità relativa.

Una volta stabilite le interazioni tra il patogeno e le condizioni ambientali si può pensare alla realizzazione di un modello in grado di simulare, attraverso l'impiego di dati meteorologici, la comparsa e/o l'andamento epidemico di una malattia.

PER APPROFONDIRE

Zhai, Z., Martínez, J. F., Beltran, V., & Martínez, N. L. (2020). Decision support systems for agriculture 4.0: Survey and challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*, 170, 105256.

CAPITOLO V

Le fasi della realizzazione di un modello di simulazione

FASE 1

MESSA A PUNTO DEL MODELLO

Fase 1.a - Definizione della problematica - Si tratta di individuare una coltura ed un patogeno per cui sia conveniente creare modelli di simulazione come supporto alla difesa integrata.

L'individuazione si può basare su diversi criteri:

- Prettamente economici: in base all'estensione colturale o al suo elevato valore qualitativo (es. coltura protetta) o all'elevato costo per la protezione della stessa dalle malattie;
- Nell'ottica di produzione integrata:

trasformazione di vecchie strategie di difesa a calendario, riduzione del numero di trattamenti con benefici ambientali e qualitativi.

Fase 1.b - Creazione del diagramma di flusso - Le fasi del processo infettivo vengono esaminate e strutturate secondo l'analisi dei sistemi. Si individuano, in tal modo, gli stati del sistema e le costanti e variabili che determinano il passaggio da uno stato al successivo.

Fase 1.b.1 L'analisi del sistema

L'analisi del sistema e i diagrammi di flusso possono essere utilizzati per

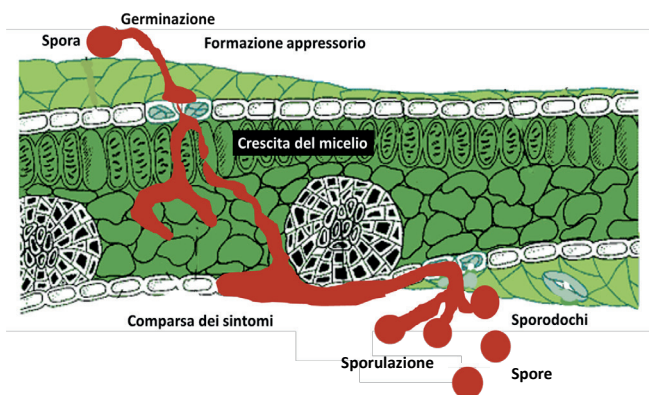


Figura 3. Il ciclo generalizzato di una malattia fungina

comprendere e visualizzare la dinamica delle malattie e dei parassiti. Il punto di partenza dell'analisi del sistema ospite-patogeno è l'identificazione dei componenti del sistema stesso.

Supponiamo di voler analizzare il sistema ospite-patogeno di una generica malattia fungina, il punto di partenza è il suo ciclo vitale schematizzato in fig. 3.

Il ciclo generalizzato di una malattia fungina delle piante coltivate può essere suddiviso in diversi stadi (o stati) (Fig. 3) che sono:

L'Inoculazione: In questa fase, l'agente patogeno è presente nell'ambiente sotto forma di spore o strutture di sopravvivenza. Queste spore

possono essere trasportate dal vento, dalla pioggia, dagli insetti o da altri mezzi sulla pianta.

L'adesione e l'Infezione: le spore del fungo depositate sulla superficie delle piante ospiti producono strutture specializzate, come apressori o strutture di ancoraggio, che gli consentono di aderire saldamente alla pianta ospite. Il fungo sviluppa poi strutture di penetrazione, come i tubi germinativi, per penetrare nei tessuti della pianta ospite.

La colonizzazione e la crescita fungina: una volta penetrato nei tessuti della pianta, il fungo inizia a crescere e a colonizzare il suo ospite che

SCHEMA 2

I Parametri Meteorologici

Temperatura

La temperatura dell'aria esprime il «grado d'agitazione delle molecole d'aria», impiegando una grandezza scalare chiamata appunto "grado".

In Italia viene correntemente impiegato il "grado centigrado", detto anche "grado Celsius", il cui simbolo è: °C.

Tale unità di misura è definita in modo che i valori 0°C e 100°C corrispondano rispettivamente al punto di fusione e al punto d'ebollizione dell'acqua a pressione atmosferica normale.

Umidità relativa

L'aria, per quanto secca possa essere, contiene sempre una certa quantità d'acqua, o meglio, di vapore acqueo. La quantità massima di vapore che può essere contenuto dall'aria varia con la sua temperatura e con la pressione: ad esempio, più l'aria è calda, più vapore essa può contenere.

Per questo motivo si è preferito introdurre un parametro "relativo", che esprime cioè il rapporto tra la quantità effettiva di vapore contenuto e la quantità massima che quella massa d'aria potrebbe contenere nelle stesse condizioni di temperatura e pressione.

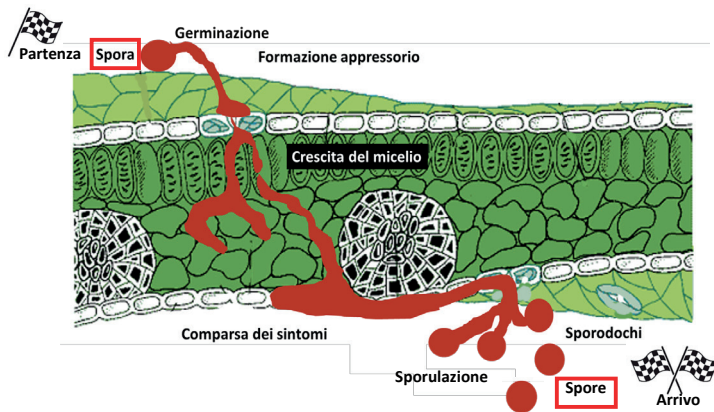


Figura 4. Punti di “partenza” ed “arrivo” del sistema ospite-patogeno

risulta ancora asintomatico e si parla quindi di fase “latente” della malattia.

La diffusione e la disseminazione: terminata la fase latente compaiono i sintomi e, a volte dopo brevissimo tempo, il fungo produce nuove spore che vengono rilasciate dai tessuti infetti.

Il periodo trascorso dall’infezione alla comparsa dei sintomi è chiamato periodo d’incubazione, dall’infezione all’inizio della sporulazione abbiamo il periodo di latenza e il periodo in cui vengono prodotte le nuove spore viene definito come periodo “infezioso”.

Questo ciclo generalizzato rappresenta la tipica sequenza di eventi per molte malattie fungine. Tuttavia, è importante ricordare che ci sono molte variazioni in base al tipo di fungo patogeno, alla pianta ospite e alle condizioni ambientali.

Volendo analizzare il sistema sopra descritto occorre:

1. Identificare il punto di partenza e quello di arrivo del sistema in analisi (Fig. 4). Nel nostro caso si partirà dal contatto tra l’ospite e il patogeno (spora) per arrivare alla produzione di nuove spore che saranno in grado di propagare ulteriormente le infezioni o in grado di resistere alla stagione avversa.

IDENTIFICAZIONE DEI COMPONENTI DEL SISTEMA.

- 1.1 Le variabili di stato (Fig. 5) in un modello per una malattia fungina sono elementi che descrivono lo stato del sistema e influenzano la dinamica della malattia. Alcune variabili di stato comuni in questo contesto sono:

Severità della malattia: misura l’estensione e l’intensità dei sintomi sulla pianta. Può includere parametri come la quantità di tessuto vegetale danneggiato o la gravità dei sintomi (schema 3).

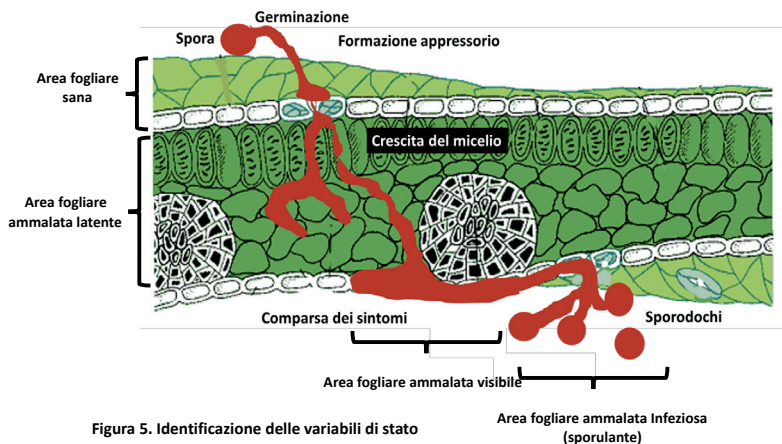


Figura 5. Identificazione delle variabili di stato

Figura 5. Identificazione delle variabili di stato

Fase di infezione: indica in quale fase del ciclo di vita del fungo si trova la malattia sulle piante. Questo può includere le fasi di incubazione, colonizzazione e sporulazione del fungo.

Incidenza della malattia: rappresenta la percentuale di piante infette nel campo o nell'area considerata. È un indicatore chiave per valutare la diffusione della malattia (schema 3).

Condizioni ambientali: variabili come temperatura, umidità relativa e disponibilità di acqua influenzano notevolmente lo sviluppo delle malattie fungine. Possono essere considerate come variabili di stato in quanto hanno un impatto diretto sulle interazioni fungo-pianta (schema 2, 2.1, 2.2).

Diffusione della malattia: indica come la malattia si diffonde all'interno della coltura o tra le colture. Può

essere influenzata da fattori come il vento, la pioggia o la presenza di vettori.

1.2 Le variabili che regolano i cambiamenti di stato vengono definite "tassi" (o ratei: di fatto indicano la "velocità" con cui una variabile di stato sta cambiando. Sono ad esempio il tasso di infezione, il tasso di sporulazione, la pressione di infezione, ecc. Sono dipendenti per lo più dai parametri ambientali (Fig. 6).

Nell'epidemiologia botanica, il tasso di diffusione della malattia o di infezione è influenzato da vari parametri che descrivono la dinamica delle malattie delle piante all'interno di una popolazione.

I parametri specifici e i relativi calcoli possono variare a seconda del tipo di malattia vegetale, delle caratteristiche delle piante ospiti e della natura dell'agente patogeno.

SCHEMA 2.1 Precipitazioni

Le precipitazioni atmosferiche sono senza dubbio uno dei fattori climatici di maggior importanza: il territorio, la flora e la fauna sono profondamente condizionati dalla quantità e dall'intensità delle piogge.

Le precipitazioni traggono origine dai fenomeni di condensazione dell'umidità atmosferica sotto forma di particelle d'acqua liquide o solide. La pioggia, la grandine e la neve sono dette "idrometeorie di precipitazione". Per descrivere opportunamente un evento precipitativo si utilizzano solitamente due parametri: l'intensità e la quantità accumulata. Per quanto riguarda quest'ultima, l'unità di misura adottata dai meteorologi è il millimetro, che equivale ad un litro d'acqua per metro quadrato di superficie.

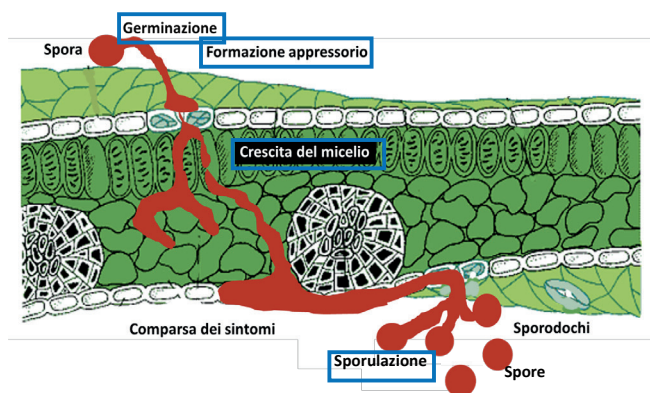


Figura 6. Identificazione dei tassi



Figura 7. Rappresentazione schematica del "funzionamento" di un tasso

SCHEMA 2.2

Bagnatura fogliare

La bagnatura fogliare è uno dei parametri più importanti da considerare per lo sviluppo delle malattie fungine. La presenza di un velo d'acqua sulla superficie delle foglie, infatti, permette il movimento e la germinazione delle spore di alcuni microrganismi fungini e la loro penetrazione all'interno dei tessuti dell'ospite. Il parametro può essere misurato con l'uso di appositi sensori oppure simulato con algoritmi specifici. Poiché non esiste un sensore "universale" e, talvolta, i dati misurati da due sensori differenti possono essere molto diversi fra loro, sarebbe preferibile utilizzare un metodo di stima della bagnatura basato sui parametri meteorologici certi e quindi applicabile indipendentemente dalla presenza/assenza di un sensore di misurazione.

Un buon metodo di stima è quello che prevede l'uso del cosiddetto deficit di pressione di vapore (VPD). Di fatto, la presenza di acqua liquida sulla superficie fogliare in assenza di precipitazioni è dovuta al fenomeno della condensazione che avviene quando l'aria a una determinata temperatura ha raggiunto un livello di saturazione tale che non può più contenere acqua in stato aeriforme e quindi forma goccioline liquide sulle superfici. Il valore di saturazione aumenta all'aumentare della temperatura, quindi maggiore sarà la temperatura, maggiore sarà la quantità d'acqua che potrà contenere l'aria prima di creare condensa. Viceversa quando le temperature si abbasseranno questa capacità dell'aria di trattenere acqua in stato aeriforme diminuirà.

La differenza tra l'ammontare di acqua in stato aeriforme che l'atmosfera (aria) è in grado di contenere a una certa temperatura e l'ammontare di acqua in essa contenuta in quel momento prende il nome di deficit di pressione di vapore (VPD) ed è misurata in kilopascal (KPa) relativa inferiore. Valori molto bassi di VPD indicano che la probabilità di formazione di condensa è molto alta quindi avremo la presenza di bagnatura fogliare.

Alcuni esempi e modalità per calcolare i tassi sono illustrati nel capitolo "correlazione dei dati".

Il tasso si può esemplificare pensando ad un rubinetto che "apre, regola e chiude" il passaggio da uno stato all'altro (Fig. 7).

1.3 Parametri (parametri o variabili guida): sono fattori esterni che hanno un'influenza sul processo, ma il processo non ha alcuna influenza su di essi, ad esempio i dati meteorologici (schema 2 e 2.1).

1.4 Variabili ausiliarie o intermedie: sono come i parametri ma a loro volta sono influenzate da altri parametri e, in parte, dal processo. ad esempio il periodo di latenza, il periodo infezioso, la bagnatura fogliare calcolata (schema 2.3), l'effetto fungicida, ecc.

2. Rappresentazione del diagramma di flusso: rappresenta sostanzialmente la dinamica del sistema. Vengono utilizzati simboli e, una volta terminato, si può anche definire come la prima versione del modello che vogliamo realizzare (Fig. 8 e 9).

Fase 2 - Strutturazione del modello matematico ed informatizzazione dello stesso - Reperendo dati bibliografici o realizzando prove di campo

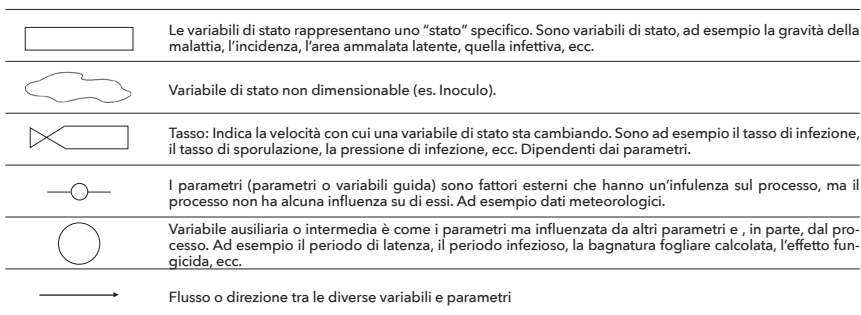


Figura 8. Simboli usati nell'analisi dei sistemi per la creazione del diagramma di flusso.

Param./Variabile: Descrizione

INOC: Inoculo

- AF: Area fogliare
 - D: Disponibile
- A: Ammalata
 - L: Latente
 - V: Visibile
 - IN: Infeziosa

- GER: Tasso di germinazione
- APP: Tasso di adesione
- MIN: Tasso crescita micelio
- SPOR: Tasso di Sporulazione
- LP: Periodo di latenza
- InP: Periodo infezioso
- T: Tempepratura (°C)
- BF: Bagnatura foliare (Ore)
- L: Luce (Ore)

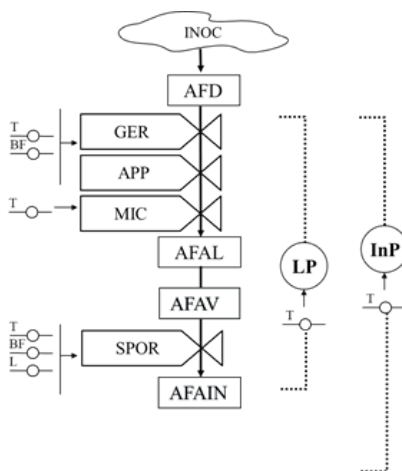


Figura 9. Analisi del sistema ospite-patogeno per una generica malattia fungina rappresentato come diagramma di flusso.

SCHEMA 3

Cenni di fitopatometria

La fitopatometria è una branca della fitopatologia che si occupa della misurazione e della valutazione dei sintomi e dei danni causati alle piante da malattie, parassiti, fattori ambientali o agenti patogeni. Questa disciplina è fondamentale per la diagnosi delle malattie delle piante e la valutazione dell'entità dei danni subiti. Coinvolge la misurazione accurata dei sintomi delle malattie, come lesioni, macchie, ingiallimenti, deformità e altri segni visibili sulla pianta. Queste misurazioni possono essere fatte in modo quantitativo, ad esempio misurando le dimensioni delle lesioni o la percentuale di tessuto colpito.

Oltre alla misurazione dei sintomi, la fitopatometria valuta l'entità dei danni causati alla pianta. Questa valutazione può includere il calcolo delle perdite di resa, la riduzione della qualità del raccolto o altri effetti negativi sulla pianta.

Inoltre aiuta a identificare la causa dei sintomi osservati sulla pianta. Questo può essere fatto attraverso l'osservazione delle caratteristiche delle lesioni, la ricerca di segni specifici degli agenti patogeni (come spore o strutture microscopiche) o l'uso di test di laboratorio.

o di laboratorio ad hoc si esaminano i singoli step dell'analisi del sistema e si implementano equazioni matematiche che regolano i passaggi attraverso i diversi stadi. La serie di equazioni viene informatizzata e si realizza un programma computerizzato di simulazione.

Fase 3 - Validazione del modello utilizzando dati storici - Una volta realizzato, il modello deve essere validato. Si reperiscono dati storici di osservazioni epidemiologiche e meteorologiche e si confrontano i risultati ottenuti dal modello con quelli osservati in campo per effettuare eventuali aggiustamenti della struttura dello stesso.

Fase 4 - Verifica e validazione del modello in campo

Il modello validato viene sottoposto alla prova di campo, ossia viene introdotto in un sistema di difesa integrata e quindi messo a disposizione dei tecnici o degli agricoltori che con l'uso possono simulare, in tempo reale, la presenza e/o l'andamento della malattia e quindi verificare l'output del modello con la situazione effettivamente presente in campo.

Ai fini di poter disporre di un modello sicuramente affidabile qualora si verificano condizioni di andamenti meteorologici o colturali particolarmente anomali o se le risposte di campagna non fossero ritenute soddisfacenti, può essere necessario ripetere sia la fase 1.d che la stessa fase 2 di realizzazione del modello.

Fase 5 - Inserimento del modello in un DSS

Il modello può essere usato singolarmente o abbinato ad altri modelli esistenti per lo stesso patogeno o per la stessa coltura realizzando il DSS dove possono essere introdotte ulteriori informazioni geografiche per evidenziare situazioni di zone particolari, liste di suscettibilità varietale e consigli per i trattamenti attraverso simulazioni di efficacia di diversi principi attivi sulla malattia.

Fase 6 - Mantenimento ed aggiornamento del sistema

Si tratta di un'attività complementare allo sviluppo dei modelli che prevede l'inserimento di nuovi elementi sulla base di nuove esigenze della difesa e recenti acquisizioni della ricerca connesse a completare il più possibile i modelli ed i DSS realizzati.

PER APPROFONDIRE

Dent, J. B., & Anderson, J. R. (1971). *Systems analysis in agricultural management*. Sydney, Australia, John Wiley & Sons Australasia Pty Ltd.

Mayee, C. D., & Datar, V. V. (1986). *Phytopathometry*. *Phytopathometry*.

CAPITOLO VI

L'analisi di sistema e il diagramma di flusso per i fitofagi

Nel caso si volesse creare un modello per i fitofagi, le fasi e la metodologia sono le stesse già viste per la creazione dei modelli per le malattie fungine.

Quindi, anche in questo caso, si parte dall'analisi della problematica e si arriva, tramite l'analisi del sistema, a definire un diagramma di flusso che conterrà le variabili, i tassi e i parametri necessari per lo sviluppo del modello.

Vediamo un esempio: la realizzazione di un modello per la dorifora della patata (*Leptinotarsa decemlineata*). Come visto in precedenza

l'analisi del sistema patata-dorifora inizia dal ciclo biologico del parassita che è un insetto "olometabolo" ossia che presenta 4 fasi di sviluppo nettamente distinte tra loro: uova, larve, pupe e adulti (Fig. 10).

La Dorifora sverna allo stadio di adulto, interrata nel terreno ad una profondità di circa 20-30 cm. In primavera gli adulti escono dal terreno e, raggiunta la pianta ospite, iniziano immediatamente a nutrirsi. Successivamente si accoppiano e depongono le uova sulla parte inferiore delle foglie. Le larve neonate (1a

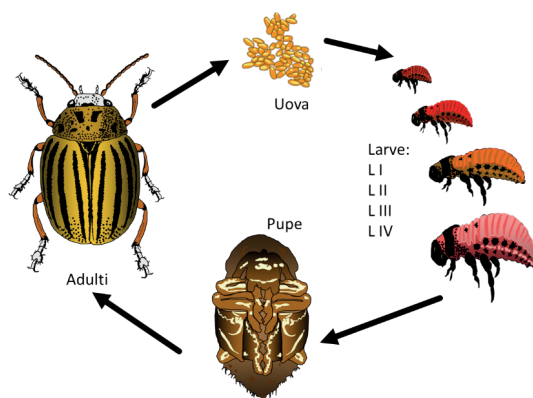


Figura 10. Ciclo della dorifora della patata.

generazione) sono molto voraci e continuano l'attività trofica a danno della vegetazione, già iniziata dagli adulti. Questi, abbastanza longevi, continuano ad essere presenti sulla vegetazione insieme alle larve. Le larve mature (larve di IV età) scendono nel terreno (circa 10-20 cm di profondità) e si impupano per dare origine ad una 2a generazione estiva. Gli adulti di questa generazione possono svernare, nelle regioni fredde, oppure originare una seconda generazione larvale. Negli ambienti caldi può esservi una terza generazione di adulti che, comunque, difficilmente viene completata. In questo caso, stabilendo come punto di partenza la variabile "adulti svernanti", l'identificazione delle altre variabili è semplice in quanto non saranno altro che le fasi succes-

sive di sviluppo ossia: uova, larve, pupe ed adulti. I tassi che influenzano i passaggi di stato saranno:

- Adulti: tasso di sopravvivenza, sviluppo, fertilità e mobilità;
- Uova: tasso di sopravvivenza e di sviluppo;
- Larve: tasso di sopravvivenza e di sviluppo;
- Pupe: tasso di sopravvivenza e di sviluppo.

I principali parametri che regolano i tassi sono:

- **Temperatura:** La temperatura ambiente gioca un ruolo cruciale nel determinare la velocità dello sviluppo dell'insetto. Temperature più elevate accelerano il processo, mentre temperature più basse lo rallentano.

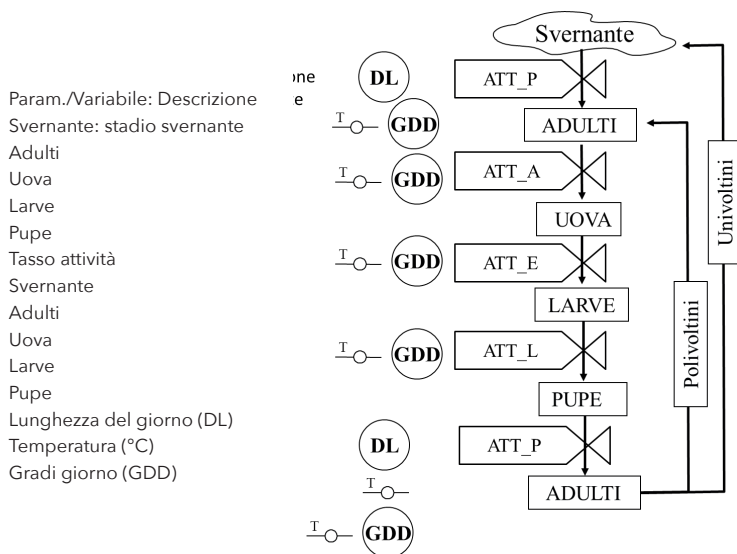


Figura 11. Diagramma di flusso dall'analisi del sistema dorifora - patata.

- **Umidità:** Anche l'umidità relativa può influenzare lo sviluppo degli insetti. Ad esempio, livelli di umidità ottimali possono favorire la crescita e lo sviluppo delle larve.
- **Lunghezza del giorno:** La durata delle fasi del ciclo biologico può essere influenzata dalla lunghezza del giorno. Alcuni insetti sono sensibili alla luce e regolano il loro sviluppo in base alle condizioni luminose.

Nel caso degli insetti occorre poi distinguere se siano "univoltini" o "polivoltini".

Gli insetti univoltini completano il loro ciclo di vita e producono una sola generazione all'anno mentre i polivoltini, al contrario, possono completare più di una generazione all'anno.

A questo punto non occorre far altro che impostare il diagramma di flusso utilizzando la simbologia di fig.8. Il risultato è illustrato nella fig.11.

PER APPROFONDIRE

Tremblay, E. (2003). Entomologia applicata vol. 1-4. Liguori.

CAPITOLO VII

Il concetto del Tempo cronologico e del tempo fisiologico

Il tempo cronologico e il tempo fisiologico sono due concetti distinti che vengono spesso utilizzati in vari contesti, compresa la biologia e l'agricoltura, per descrivere il passare del tempo in modi diversi.

Il tempo cronologico è il concetto più familiare e comunemente usato per misurare il tempo nella realtà quotidiana. Si basa sulla percezione del tempo in termini di ore, giorni, mesi, anni, ecc.

È un'unità di misura lineare e uniforme, in cui ogni unità (come un secondo, un minuto o un giorno) ha la stessa durata. Ad esempio, una giornata ha 24 ore e ogni ora ha 60 minuti.

Il tempo fisiologico si riferisce al modo in cui gli organismi viventi, inclusi gli esseri umani, percepiscono e vivono il passare del tempo in base ai loro processi biologici e fisiologici interni.

Nel contesto delle piante, il tempo fisiologico può riferirsi a eventi biologici come la germinazione dei semi, la fioritura o la maturazione dei frutti, che seguono cicli biologici interni indipendenti dal tempo cronologico. La stessa cosa accade per le malattie e i parassiti dove il tempo fisiologico scandisce i pas-

saggi di stadio.

Il tempo cronologico è la misura oggettiva e uniforme del passare del tempo, mentre il tempo fisiologico si riferisce alla percezione e alla regolazione del tempo da parte degli organismi viventi in base ai loro processi biologici interni. Entrambi i concetti sono importanti in contesti diversi e contribuiscono alla nostra comprensione del tempo e dei ritmi biologici.

Esempio di trasformazione da tempo cronologico a fisiologico.

La durata del periodo di latenza del fungo patogeno *Alternaria spp.* a temperatura costante di 20°C è di 6 giorni (tempo cronologico). Per ottenere il tempo fisiologico è sufficiente trasformare il periodo di latenza espresso in giorni come tasso:

Nel nostro esempio:

Tasso (Latenza) = 1/giorni = 1/6 = 0.1666.

Ossia ad una temperatura di 20°C il periodo di latenza ha una durata pari a 0.14 unità.

CAPITOLO VIII

Alcuni concetti di statistica essenziale

L'errore, la deviazione standard e l'intervallo di confidenza sono concetti statistici utilizzati per valutare la precisione e l'affidabilità dei risultati ottenuti da studi o esperimenti. Ecco come sono definiti e come si relazionano tra loro:

L'errore è la discrepanza tra il valore misurato o stimato e il valore vero o il risultato desiderato. In altre parole, è la differenza tra ciò che si osserva o si calcola e ciò che si dovrebbe ottenere in condizioni ideali o reali.

Può essere causato da vari fattori, tra cui errori di misurazione, errori di campionamento, errori sperimentali, e così via. Inoltre l'errore può essere positivo (quando il valore misurato è superiore al valore vero) o negativo (quando il valore misurato è inferiore al valore vero).

La deviazione standard è una misura di dispersione o variabilità dei dati in un insieme di dati. Indica quanto i dati si discostano dalla media (valore medio) del set di dati.

Una deviazione standard maggiore indica una maggiore dispersione dei dati, mentre una deviazione standard minore indica una dispersione più limitata.

È spesso rappresentata con il simbo-

lo " σ " (sigma) per una popolazione e " s " per un campione.

L'intervallo di confidenza (IC) è un intervallo di valori attorno a una stima (come una media o una proporzione) che è costruito in modo da includere il valore vero con una certa probabilità di confidenza.

L'intervallo di confidenza tiene conto della variabilità dei dati e dell'errore campionamento.

Comunemente, viene espresso con un livello di confidenza specificato (ad esempio, il 95% di confidenza), che indica la probabilità che l'intervallo contenga il valore vero.

La deviazione standard è spesso utilizzata per calcolare l'intervallo di confidenza. Ad esempio, un intervallo di confidenza al 95% per una media può essere calcolato come la media campionaria più o meno due volte la deviazione standard campionaria. Questo significa che con il 95% di confidenza, ci aspettiamo che il valore vero si trovi all'interno di quell'intervallo.

In breve, l'errore rappresenta la discrepanza tra il valore reale e il valore misurato, la deviazione standard misura la variabilità dei dati e l'intervallo di confidenza fornisce una stima della gamma di valori entro la quale ci aspettiamo che si trovi il valore vero con una certa probabilità di confidenza. Questi concetti sono fondamentali per la statistica inferenziale e per l'interpretazione dei risultati delle indagini e degli esperimenti. ambientale e promuovere la sostenibilità agricola.

CAPITOLO IX

Correlazioni tra i dati e la regressione lineare semplice

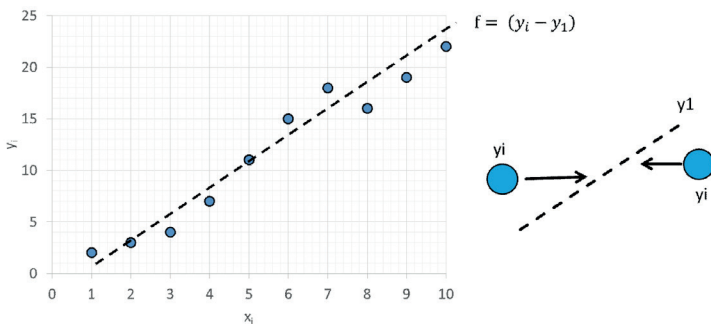
La correlazione tra i dati è una misura statistica che indica quanto due variabili si muovano insieme. Se c'è una correlazione positiva, significa che quando una variabile aumenta, l'altra tende ad aumentare. Viceversa, una correlazione negativa indica che quando una variabile aumenta, l'altra tende a diminuire.

La correlazione è misurata da un coefficiente di correlazione (Pearson), che varia da -1 a 1. Un valore di 1 indica una perfetta correlazione positiva, -1 indica una perfetta correlazione negativa, e 0 indica assenza di correlazione.

La forma più semplice, ma comunque basilare, per la correlazione tra i dati è la regressione lineare semplice. Questa è una tecnica statistica che cerca di stabilire la relazione lineare tra due variabili. In termini semplici, cerca di adattare una linea retta ai dati in modo da minimizzare la differenza tra i valori osservati e quelli previsti dalla linea.

L'equazione di una regressione lineare semplice è spesso espressa come:

$$[1] \quad y = a + bx$$



Trovare una relazione lineare che riduca il più possibile le differenze (residui) tra i punti misurati e quelli calcolati da una funzione di tipo lineare:

$$y_1 = a + b \cdot x$$

Figura 12. Regressione lineare semplice.

dove:

Y è la variabile dipendente (quella che si sta cercando di predire),

X è la variabile indipendente (il fattore che influisce su Y)

b è la pendenza della linea (indica quanto Y cambia al variare di X),

a è l'intercetta (il valore di Y quando X è zero).

Il processo di regressione lineare implica il calcolo di a e b in modo che la linea aderisca meglio possibile ai dati (Fig 12).

Il metodo dei minimi quadrati è una tecnica utilizzata nella regressione lineare per trovare la migliore linea di adattamento ai dati. L'obiettivo è minimizzare la somma dei quadrati delle differenze tra i valori osservati e quelli previsti dalla linea di regressione.

Nella regressione lineare semplice, il metodo dei minimi quadrati coinvolge il calcolo dei coefficienti a e b dell'equazione della retta $Y=a+b \cdot X$ in modo che la somma dei quadrati degli scarti tra i valori osservati Y e quelli previsti Y1 sia minima.

La somma dei quadrati degli scarti è calcolata come:

$$[2] \sum f^2 = \sum (y_i - y_1)^2$$

Dove:

$$[3] y_i = a + b \times x_i$$

sostituendo y1 nella [2] diventa:

$$[4] \sum f^2 = \sum (y_i - a + b \times x_i)^2$$

Da cui possiamo derivare:

$$[5] b = \frac{\sum (x_i - x_m) \times (y_i - y_m)}{\sum (x_i - x_m)^2}$$

E

$$[6] a = y_m - b \times x_m$$

Il metodo dei minimi quadrati è ampiamente utilizzato poiché fornisce una stima robusta e matematicamente solida dei coefficienti di regressione.

Riassumendo, la regressione lineare utilizza una funzione lineare per modellare la relazione tra i dati. La forma generale di una regressione lineare semplice è $y=a + b \cdot x$ dove y (ordinata) è la variabile dipendente, x (ascissa) è la variabile indipendente, b è la pendenza della retta, e a è l'intercetta.

CAPITOLO X

Correlazioni tra i dati e la regressione non lineare

La differenza principale tra la regressione lineare e la regressione non lineare risiede nella forma della funzione matematica utilizzata per modellare la relazione tra le variabili indipendenti e dipendenti.

La regressione non lineare è più flessibile e può adattarsi a una gamma più ampia di relazioni funzionali. La scelta tra i due dipende dalla natura dei dati e dalla relazione che si vuol-

le modellare. Tuttavia, la gran parte dei processi biologici non segue un andamento lineare, ma più spesso curvilineo.

Ne è un esempio la funzione Logistica o sigmoide.

Es.

Prendiamo la serie di dati x, y rappresentati in fig. 13

X	Y _i
1	0.001
5	0.005
10	0.02
15	0.09
20	0.2
25	0.5
30	0.8
35	0.89
40	0.98
45	0.99

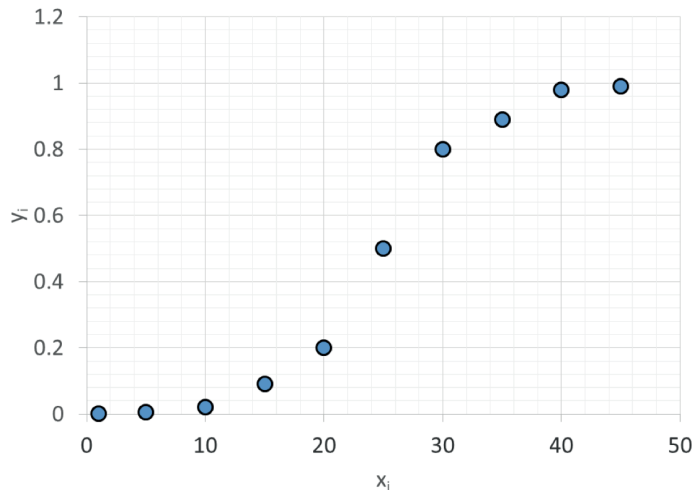


Figura 13. Rappresentazione grafica dei dati con andamento sigmoide

Possiamo trasformare i dati Y nella forma seguente:

$$[7] \quad y_1 = \text{Log} \frac{y}{1-y}$$

Anche detta "trasformazione LOGIT".

I dati rappresentati assumeranno una forma lineare (Fig.14)

A questo punto possiamo interpola-

re i dati con un'equazione lineare ed ottenere i coefficienti a e b col metodo dei minimi quadrati.

La regressione finale, in forma logistica, sarà rappresentata usando la trasformazione LOGIT inversa ed avrà la forma:

$$[8] \quad y = \frac{1}{1+(-(e^{a+b*x}))} \quad (\text{Fig. 15})$$

X	Y _i	Y ₁
1	0.001	-6.91
5	0.005	-5.29
10	0.02	-3.89
15	0.09	-2.31
20	0.2	-1.39
25	0.5	0.00
30	0.8	1.39
35	0.89	2.09
40	0.98	3.89
45	0.99	4.60

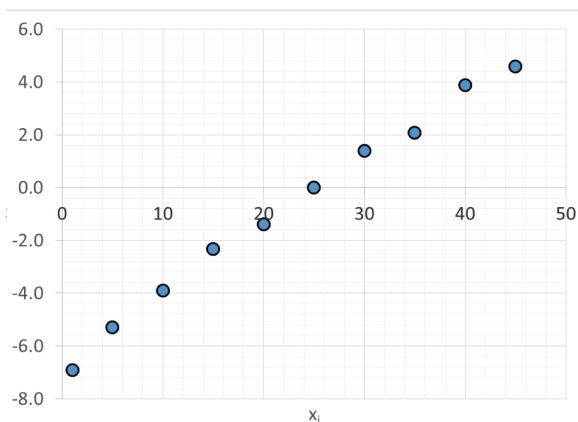


Figura 14. Rappresentazione grafica dei dati trasformati (LOGIT) con andamento lineare

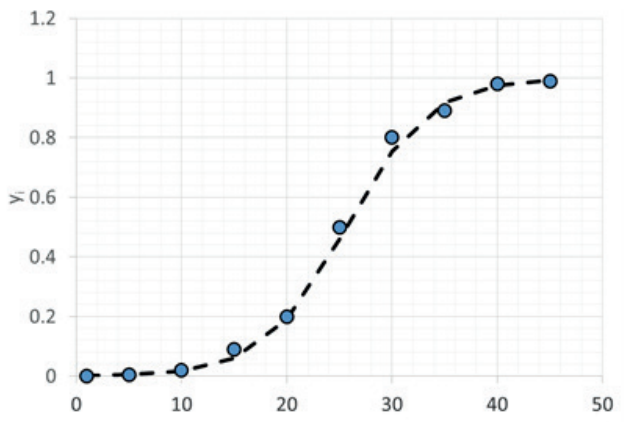
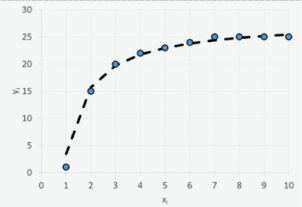
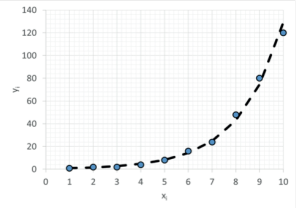
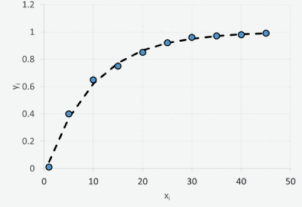
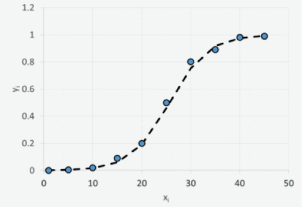
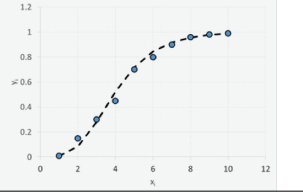


Figura 15. Interpolazione dei dati con la funzione logistica trasformata [8]

A titolo di esempio sono indicate funzioni e rispettiva trasformazione nella tabella seguente alcune delle lineari.

Funzione non lineare	Trasformazione lineare	Funzione
<p>Iperbolica</p> 	$y_1 = x_i \times y_i$	$y_i = \frac{a + b \times x_i}{x_i}$
<p>Esponenziale</p> 	$y_1 = \text{Ln}(y_i)$	$y_i = e^{(a+b \times x_i)}$
<p>Monomolecolare</p> 	$y_1 = \text{Ln} \frac{1}{1 - y_i}$	$y_i = 1 - \frac{1}{e^{a+b \times x_i}}$
<p>Logistica</p> 	$y_1 = \text{Ln} \frac{y_i}{1 - y_i}$	$y_i = 1 - \frac{1}{1 + e^{a+b \times x_i}}$
<p>Gomperz</p> 	$y_1 = -\text{Ln}(-\text{Ln}y_i)$	$y_i = e^{-e^{-(a+b \times x_i)}}$

La regressione non lineare utilizza una funzione non lineare per modellare la relazione tra le variabili. La forma specifica della funzione può variare notevolmente a seconda del tipo di relazione che si sta cercando di rappresentare.

Adattabilità: La regressione non lineare è appropriata quando la relazione tra le variabili non può essere ben approssimata da una retta. Può essere utilizzata per modellare relazioni più complesse, come curve, esponenziali, logaritmiche, sigmoidali, etc.

Adattabilità: La regressione lineare è appropriata quando la relazione tra le variabili può essere approssimata da una retta. Ad esempio, se i dati mostrano una tendenza lineare. Questi concetti sono fondamentali per la statistica inferenziale e per l'interpretazione dei risultati delle indagini e degli esperimenti. ambientale e promuovere la sostenibilità agricola.

CAPITOLO XI

Correlazioni tra i dati con curve “a campana”

Molto spesso i processi biologici, in particolare quelli legati alla temperatura, presentano valori minimi o nulli al di sotto o al di sopra di un valore minimo e di un valore massimo, rispettivamente. I valori crescono poi dal minimo fino a raggiungere un “optimum” e ridiscendono verso il valore massimo. In questo caso si parla di correlazioni “a campana” come illustrato nella fig. 16.

A titolo di esempio si riportano 3 delle funzioni più utilizzate per la correlazione dei dati biologici con andamento “a campana”.

Funzione Beta - Semplice

Una semplice funzione che spesso è utilizzata nella modellizzazione di processi biologici, ecologici o fisiologici è la generica funzione Beta modificata in modo da ottenere:

x_i	y_i
0	0
5	0.02
10	0.04
15	0.06
20	0.2
25	0.4
30	0.6
35	0.8
40	0.9
45	0.95
50	0.99
55	0.95
60	0.9
65	0.8
70	0.6
75	0.4
80	0.2
85	0.06
90	0.04
95	0.02
100	0

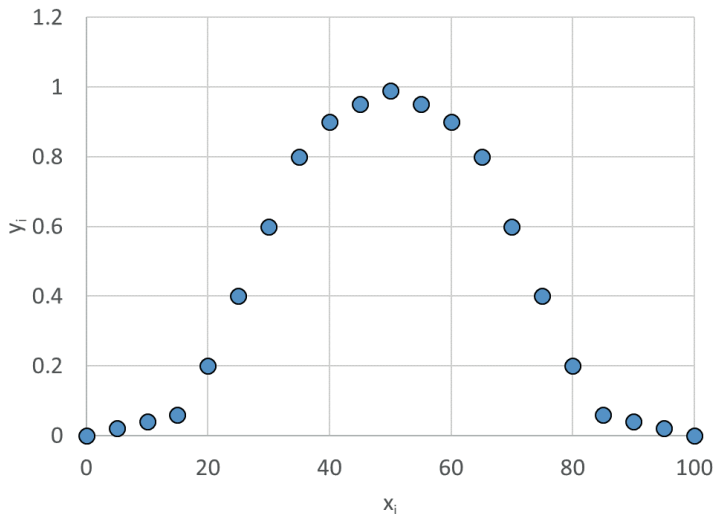


Figura 16. Rappresentazione dei dati “a campana”

$$[9] y = k * (x - x_{min})^n * (x_{max} - T)^m$$

Dove:

x è la variabile indipendente che regola il processo biologico.

x_{min} è il valore minimo della variabile indipendente al di sotto del quale il processo è limitato.

x_{max} è il valore massimo della variabile indipendente al di sopra del quale il processo è limitato.

k è una costante di scala che può influenzare l'ampiezza dell'effetto della variabile indipendente.

n e m sono esponenti che determinano la forma della risposta alla variabile indipendente (Fig.15).

La forma della funzione implica che il processo è più attivo o favorevole quando la variabile indipendente si avvicina a un valore ottimale compreso tra x_{min} e x_{max} , e diminuisce quando la variabile indipendente si discosta da questo intervallo.

La scelta dei valori di n e m , oltre a x_{min} e x_{max} , dipende spesso dalla natura specifica del processo biologico che stai cercando di modellare e dai dati sperimentali disponibili (Fig. 17).

Naturalmente in questa funzione i parametri x_{min} e x_{max} devono essere fissati arbitrariamente; il valore dell'optimum non è considerato. Questa funzione è spesso utilizzata per descrivere la risposta di un or-

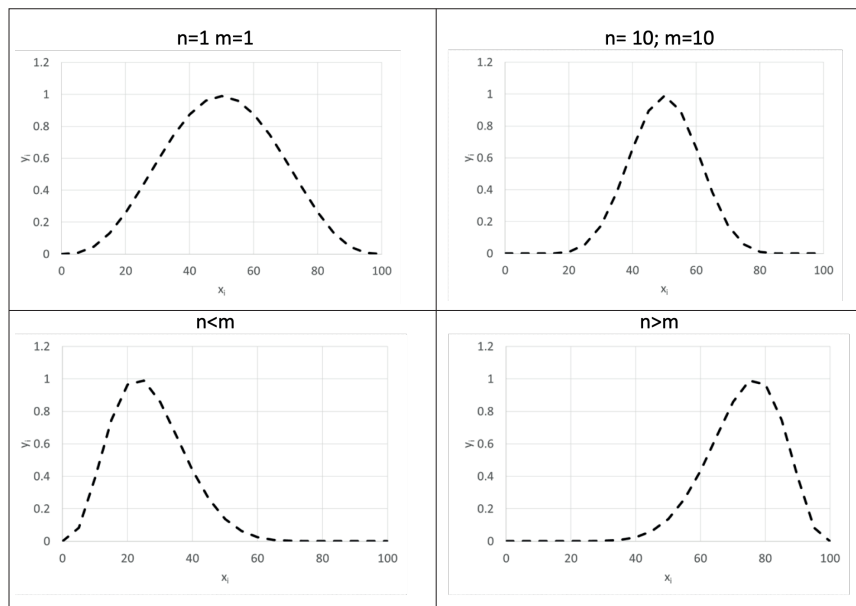


Figura 17. Comportamento della funzione al variare dei coefficienti n e m .

organismo o di un processo biologico alla variazione della temperatura.

Funzione Beta - Hau

Nel caso di processi biologici termoregolati una variazione della distribuzione Beta che tiene conto, ed è in grado anche di calcolare anche il punto di optimum del processo è la Beta-Hau (10):

Dove:

T è la temperatura che regola il processo biologico.

T_{\min} è il valore minimo della temperatura al di sotto del quale il processo è limitato.

T_{\max} è il valore massimo della temperatura al di sopra del quale il processo è limitato.

Y_{opt} è una costante di scala che può influenzare l'ampiezza dell'effetto della temperatura.

n è un'esponente che determina la forma della risposta alla temperatura.

Funzione di Brière

La funzione di Brière è una relazione matematica utilizzata per descrivere la risposta della crescita degli insetti alla temperatura. È comunemente utilizzata per modellare la relazione tra la temperatura e il tasso di sviluppo degli insetti olometaboli. La formula di Brière è espressa come segue (11):

Dove:

R_T è il tasso di sviluppo a una data temperatura T .

T_{\min} è la temperatura minima per lo sviluppo.

T_{\max} è la temperatura massima per lo sviluppo.

M costante.

Questa funzione rappresenta un modello semplificato della risposta termica degli insetti e può essere utilizzata per predire la velocità dello sviluppo in relazione alla temperatura.

$$[10] \quad y_i = y_{\text{opt}} \times \left[\frac{(T_i - T_{\min})}{(T_{\text{opt}} - T_{\min})} \right]^{n \times \frac{(T_i - T_{\min})}{(T_{\max} - T_{\text{opt}})}} \times \left[\frac{(T_{\max} - T_i)}{(T_{\max} - T_{\text{opt}})} \right]^n$$

$$[11] \quad R_t = M * T * (T - T_{\min}) * \sqrt{T_{\max} - T}$$

CAPITOLO XII

Correlazione a più variabili

I processi biologici possono essere regolati da più parametri che agiscono contemporaneamente sull'esito del processo stesso.

Ad esempio la germinazione delle spore di un fungo generico dipende da vari fattori, tra cui la temperatura e la bagnatura fogliare. Questi due fattori sono critici per il processo di germinazione e infezione.

In particolare la temperatura gioca un ruolo cruciale per cui possiamo avere una temperatura ottimale, una temperatura minima e una temperatura massima per la germinazione. La relazione esatta tra temperatura e tasso di germinazione può essere descritta mediante modelli matematici che tengono conto delle temperature minime, ottimali e massime. La bagnatura fogliare è spesso necessaria per attivare la germinazione delle spore. Questa può essere influenzata dalla presenza di rugiada, pioggia o irrigazione. La durata della bagnatura fogliare e la frequenza delle bagnature possono influenzare il tasso di germinazione. Condizioni di elevata umidità possono favorire la germinazione delle spore. La combinazione di temperatura e bagnatura fogliare può avere effetti sinergici o antagonisti sulla germina-

zione delle spore. Ad esempio, una temperatura ottimale potrebbe essere più efficace se è associata a bagnature fogliari frequenti. In questo caso il fenomeno può essere analizzato utilizzando come strumento la funzione/superficie risposta.

La superficie/risposta è uno strumento utile per visualizzare e analizzare la relazione tra due variabili, come il tasso di germinazione delle spore di un fungo in relazione alla temperatura e alla bagnatura fogliare. In questo contesto, potrebbe essere rappresentata da una superficie tridimensionale, dove due assi rappresentano la temperatura e la bagnatura fogliare, mentre il terzo asse rappresenta il tasso di germinazione.

Vediamo un esempio:

Dati: La formazione di vescicole substomatiche da percentuale di urediniospore germinate di *Puccinia recondita tritici* che hanno formato appressori in un intervallo di temperature e vari periodi di bagnatura fogliare (da: EVERSMAYER, KRAMER, ASSAN, (1988). Environmental influences on the establishment of *Puccinia recondita* infection structures. *Plant Disease* 72, 409-412).

La formazione della vescicola sub-stomatata indica che l'infezione si è stabilita con successo quindi possiamo usare i dati per modellizzare una "probabilità d'infezione" (INFP). In figura 16.A sono rappresentati i dati originali. Visto l'andamento sigmoide dei dati possiamo utilizzare una funzione logistica e quindi una trasformazione logaritmica dei dati con la LOGIT [7] (figura 16.B - F).

Si ottiene così la relazione tra il numero di ore di bagnatura e INFP. Tuttavia occorre relazionare INFP anche con la temperatura. A questo punto, guardando i dati di Fig. 18.A si può desumere che, a parità di temperatura INFP cresce ma raggiunge un valore massimo asintotico ad un numero di ore di bagnatura più che sufficienti per lo stabilirsi dell'infezione. Possiamo evincere inoltre, che ci sia-

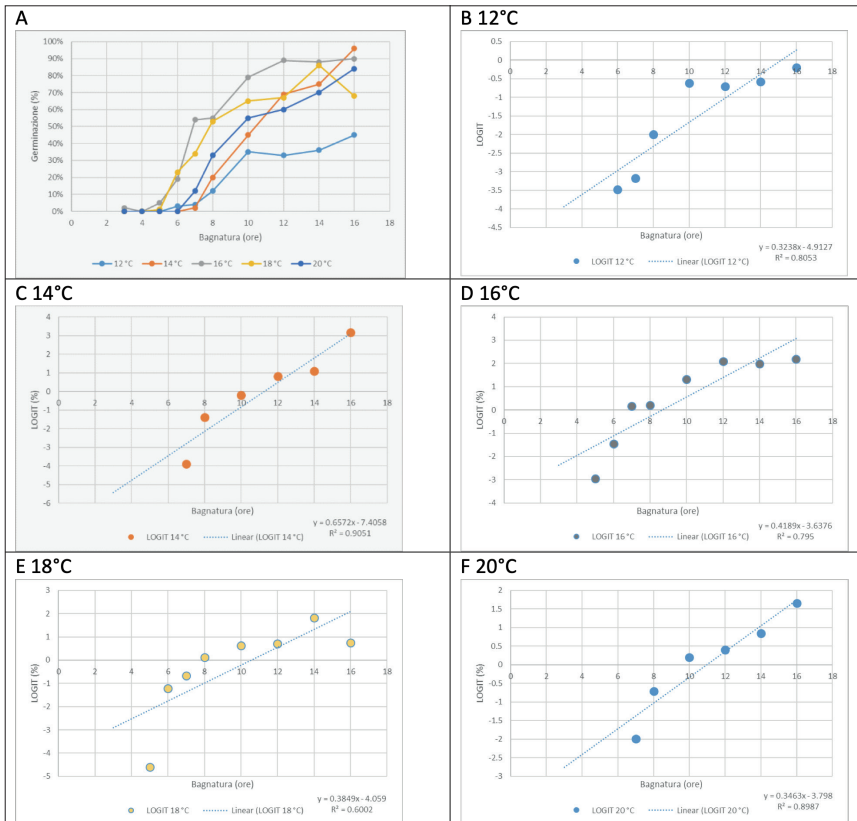


Figura 18. Percentuale di formazione di vescicole substomatiche (A) e relative trasformazioni dei dati con la LOGIT [7] (B, C, D e F).

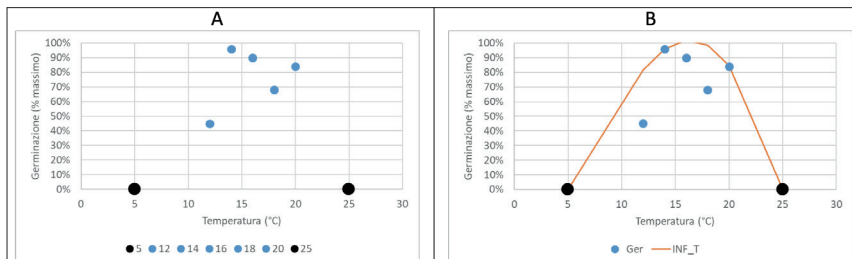


Figura 19. -A Massimo INFP raggiunto a 16 ore di bagnatura a parità di temperatura costante con l’aggiunta di 2 valori cardinali: 5 minimo e 25 massimo potenziale.
 -B funzione INFP per la temperatura ottenuta con la funzione Beta-Hau [10].

no 2 temperature “limite” (inferiore e superiore) in cui INFP è sicuramente pari a 0 indipendentemente dal numero di ore di bagnatura. Possiamo quindi prendere i valori massimi di INFP a 16 ore di bagnatura e creare il grafico di fig. 19 A.

I dati possono essere interpolati usando, ad esempio, la funzione Beta-Hau [10].

Poiché il fattore limitante di INFP ad un numero ottimale di ore di bagnatura è la temperatura, la relazione contemporanea tra INFP, tempera-

tura e bagnatura fogliare viene calcolata sostituendo il parametro y_{opt} nella [10] con la [8] utilizzando come parametri a e b della logistica la media aritmetica dei parametri a e b ottenuti con le interpolazioni singole (Fig. 18).

Si ottiene:

$$[11]$$

Rappresentato graficamente in fig. 20.

Anziché calcolare le singole funzioni

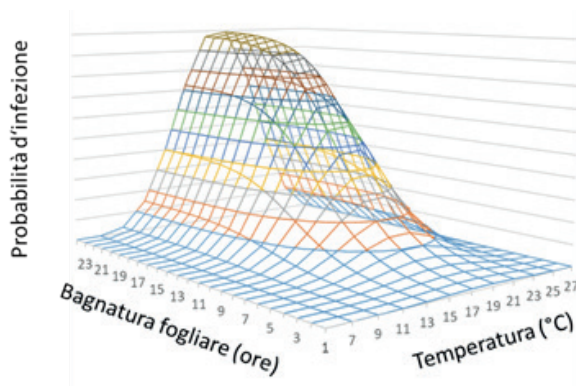


Figura 20. INFP dipendente da temperatura e bagnatura fogliare.

LOGIT e calcolare l'effetto temperatura separatamente, con appositi software è possibile interpolare i dati contemporaneamente ottenendo i parametri delle funzioni senza fare approssimazioni.

PER APPROFONDIRE (CAP. 8-12)

- Van Emden, H. F. (2019). *Statistics for ter-
rified biologists*. John Wiley & Sons.
- Campbell, C. L., & Madden, L. V. (1990). *Introduction to plant disease epidemiology*. John Wiley & Sons..
- Briere, J. F., Pracros, P., Le Roux, A. Y., & Pierre, J. S. (1999). A novel rate model of temperature-dependent development for arthropods. *Environmental Entomology*, 28(1), 22-29.
- Hau, B. (1990). Analytic models of plant disease in a changing environment. *Annual Review of Phytopathology*, 28(1), 221-245.
- Hau, Bernhard. Ein erweitertes analytisches Modell für Epidemien von Pflanzenkrankheiten. na, 1988.
- Eversmeyer, Kramer, Assan, (1988). Environmental influences on the establishment of *Puccinia recondita* infection structures. *Plant Disease* 72, 409-412

Epilogo

Qui termina questo libricolo dedicato all'affascinante mondo dell'epidemiologia nel campo delle malattie e dei parassiti delle piante coltivate.

Alessandro Manzoni, autore de "I Promessi Sposi", scrisse un saggio intitolato "I 25 lettori" nel 1827. In questo testo, Manzoni affrontò le critiche e le recensioni ricevute per la sua opera principale, "I Promessi Sposi". L'autore immaginò di avere 25 lettori che gli facevano domande e critiche sulla sua opera, consentendogli di rispondere alle critiche e spiegare le sue scelte narrative.

Ebbene caro lettore, che tu sia il primo o il venticinquesimo importa poco, importa che tu sia giunto al termine di queste poche pagine e importa, soprattutto, che tu abbia maturato davvero curiosità, domande e critiche perché allora... sarà servito a qualcosa!

Autore

dott. Paolo Racca, torinese di nascita, cuneese fino alla maggiore età, piacentino per circa 15 anni, rhodense per matrimonio e attualmente facente parte della grande famiglia A.I.R.E. (Anagrafe Italiani Residenti all'Estero) poiché risiede e lavora in Germania dal secolo scorso (1999). Perito Agrario e successivamente Dott. Agronomo, è ricercatore con esperienza trentennale per l'applicazione di tecniche di produzione e difesa integrata, con particolare riguardo per la produzione di sistemi di supporto alle decisioni (DSS - Decision Support System) basati sull'epidemiologia dei parassiti funghi e dinamica di popolazione degli insetti nocivi alle piante agrarie.

È autore o co-autore di circa 500 testi tra articoli scientifici, capitoli di libri e articoli di divulgazione per gli agricoltori.

ISBN 978-88-6337-303-5



9 788863 373035