# Le decisioni fitoiatriche: dalla lotta a calendario ai sistemi di supporto alle decisioni

**Rossi Vittorio**

## 1. L'evoluzione del contesto

Nel 1892 nasceva la Rivista di Patologia Vegetale (oggi Journal of Plant Pathology), una delle prime riviste al mondo a interessarsi di malattie delle piante; lo scopo della rivista era quello "di illustrare i parassiti delle piante, le malattie che producono, e portare sul campo pratico, oltreché le cognizione suddette, anche i modi efficaci a combattere convenientemente i parassiti". La nascita della fitoiatria, come disciplina, può però essere collocata nel secondo dopoguerra. Personaggio chiave fu il chimico tedesco Paul Hermann Müller (Olten 1899 - Basilea 1965), che ebbe l'incarico dalla società Geigy di Basilea di sviluppare insetticidi per l'agricoltura; egli orientò le sue ricerche verso prodotti chimicamente stabili e lipofili, e nel 1939 scoprì le proprietà insetticide del DDT (diclorodifeniltricloroetano), scoperta che gli valse il premio Nobel nel 1948.

Negli anni '60, la difesa delle colture dagli organismi dannosi (in particolare da funghi, batteri e artropodi fitofagi) era basta sull'impiego dei prodotti chimici con interventi a calendario (lotta a calendario). Si trattava di un metodo di difesa cautelativa o preventiva, pianificata con trattamenti a intervalli di tempo predeterminati, indipendentemente dal decorso delle infestazioni o delle epidemie, oppure dalla presenza di condizioni favorevoli per lo sviluppo degli organismi dannosi. Per il primo trattamento della stagione si faceva, di norma, riferimento alla fase fenologica in cui la coltura iniziava a essere suscettibile; dopo il primo trattamento, si proseguiva in base alla persistenza dei prodotti usati. In alternativa - e in virtù di una sincronizzazione del ciclo della pianta con quello degli organismi dannosi - la difesa era cadenzata dalle fasi fenologiche delle piante coltivate. Per esempio, indipendentemente dalla data, le fasi per l'applicazione della lotta a calendario in un frutteto potevano essere, secondo il contesto, l'ingrossamento delle gemme, l'inizio della fioritura, l'allegagione, l'inizio di accrescimento dei frutti, l'invaiatura, la caduta delle foglie, il riposo vegetativo. Si partiva quindi dal presupposto che la coltura dovese essere protetta preventivamente nelle fasi fenologiche soggette a un possibile attacco, e la protezione doveva coprire l'intera durata della fase suscettibile.

Nondimeno, già in quegli anni, erano presenti importanti iniziative volte a un approccio più razionale. Per esempio, nel novembre 1956 si tenne presso l'Università di Bologna un incontro aperto a tecnici e agricoltori in cui furono presentati i risultati di una sperimentazione collegiale di difesa dalla Peronospora della vite. Precisamente, vennero esposte le acquisizioni biologiche ed epidemiologiche su *Plasmopara viticola* che permettevano una gestione della malattia secondo intervento mirati: la regola dei 3 dieci e il calcolo della probabile durata del periodo di incubazione.

La lotta a calendario era di facile comprensione e di pratica applicazione anche da parte di chi aveva limitate conoscenze dei sistemi agrari e della loro complessità. Negli anni '60 e '70 erano molto diffusi, fra gli addetti ai lavori, manifesti e opuscoli che riportavano piani d'intervento differenziati per singole specie vegetali e avversità, con l'indicazione dei trattamenti da eseguire in corrispondenza di ogni specifica fase fenologica. Questi materiali venivano anche esposti e distribuiti gratuitamente presso i centri vendita dei prodotti fitosanitari. Questi aspetti

(semplicità e praticità) non devono essere oggi ritenuti di scarsa rilevanza. Va infatti considerato che molte conoscenze si sono andate sviluppando solo in anni successivi e che assistenza tecnica e divulgazione in agricoltura hanno iniziato a organizzarsi solo a partire dalla metà degli anni ’70.

La lotta a calendario ha però portato a un ampio, e spesso ingiustificato, impiego di prodotti chimici, con gli altrettanto conosciuti effetti negativi sulla salute dell’uomo e sull’ambiente. Queste problematiche hanno indotto le amministrazioni pubbliche a promuovere una difesa fitosanitaria più razionale e rispettosa.

Dalla metà degli anni ’70 ha così iniziato a diffondersi il concetto di lotta guidata, che è stata poi oggetto del “Piano nazionale di lotta guidata” avviato nel 1987. Il termine “lotta guidata” indicava un sistema di difesa delle colture in cui i trattamenti fitosanitari non seguono una periodicità prefissata, ma vengono effettuati solo quando se ne rileva la necessità. Mentre la lotta a calendario è svincolata dalla reale presenza dell’organismo dannoso da controllare, la lotta guidata si fond sull’accertamento in campo della sua presenza a livelli tali da giustificare un intervento di difesa.

In lotta guidata, l’intervento per il controllo dei fitofagi era spesso legato al superamento di soglie d'intervento, ossia a livelli di numerosità della popolazione, o di gravità del danno, al di sopra dei quali il trattamento insetticida (o acaricida) era giustificato; le soglie d’intervento diventavano poi soglie economiche quanto il danno arrecato dai fitofagi era superiore al costo del trattamento. Le soglie d’intervento venivano accertate con periodiche osservazioni in campo e campionamenti che permettevano di definire la reale densità della popolazione del fitofago e/o del danno sugli organi vegetali. Questi monitoraggi di campo facevano ampio ricorso a trappole di vario tipo (sessuali, colorate, alimentari, ecc.) per la cattura dei fitofagi. Per le malattie, le soglie d’intervento facevano riferimento alla densità dell’inoculo del patogeno (per esempio, tramite campionamenti e analisi del suolo per i patogeni edafici, oppure con l’impiego di captaspore per le spore fungine aerodiffuse), oppure alla presenza e gravità della malattia in campo (definita tramite piani di campionamento e stima della gravità dei sintomi sugli organi vegetali). I metodi di monitoraggio per le malattie erano più complessi e onerosi rispetto a quelli per le infestazioni da fitofagi, e spesso fornivano risposte tardive rispetto alle necessità del campo. Per questo motivo, in lotta guidata gli interventi venivano spesso definiti sulla base della presenza di condizioni ambientali favorevoli per lo sviluppo del patogeno. Questo approccio ha dato impulso all’utilizzo delle stazioni e dei dati agrometeorologici, e allo sviluppo di regole e modelli matematici in grado di definire situazioni di rischio fitosanitario, come meglio descritto in seguito.

A partire dai primi anni ’90, la lotta guidata è diventata parte integrante della difesa integrata (o IPM, *Integrated Pest Management*) prima e della produzione integrata poi, con l’attuazione dei programmi agroambientali e la successiva definizione del Sistema Nazionale per la qualità integrata delle produzioni (D.M. n. 2722 del 17 aprile 2008). La difesa integrata, come definita nel D. Lgs. n. 194 del 17/03/95, consisteva nella “applicazione razionale di un complesso di misure biologiche, biotecnologiche, chimiche, colturali o di selezione vegetale, con le quali si limita al minimo indispensabile l’impiego di prodotti fitosanitari contenenti sostanze chimiche per mantenere i parassiti a livelli inferiori a quelli che provocano danni o perdite economicamente inaccettabili”.

La Direttiva europea 128 del 2009 ha istituito un quadro per l’azione comunitaria ai fini dell’utilizzo sostenibile dei prodotti fitosanitari, riducendone i rischi e gli impatti sulla salute umana e sull’ambiente, promuovendo l’uso della difesa integrata e di approcci o tecniche

alternativi, quali le alternative non chimiche ai prodotti fitosanitari (art. 1). All'art. 3, la Direttiva 128 definisce la difesa integrata come "attenta considerazione di tutti i metodi di protezione fitosanitaria disponibili e conseguente integrazione di misure appropriate intese a scoraggiare lo sviluppo di popolazioni di organismi nocivi e che mantengono l'uso dei prodotti fitosanitari e altre forme d'intervento a livelli che siano giustificati in termini economici ed ecologici e che riducono o minimizzano i rischi per la salute umana e per l'ambiente". All'art. 14, la Direttiva 128 ha reso obbligatorio l'IPM sull'intero territorio europeo a far data dal 2014, e ne ha definiti i principi chiave, che sono stati poi recepiti in Italia dal Piano d'Azione Nazionale (PAN) adottato con Decreto Interministeriale del gennaio 2014.

Nel contesto di questo capitolo, gli aspetti essenziali della Direttiva e del PAN sono il monitoraggio degli organismi nocivi con metodi e strumenti adeguati, che dovrebbero includere le osservazioni sul campo nonché sistemi di allerta, previsione e diagnosi precoce scientificamente validi, come pure il ricorso al parere di consulenti qualificati. In base ai risultati del monitoraggio, l'utilizzatore professionale decide se e quando applicare misure fitosanitarie. Valori soglia scientificamente attendibili e validi costituiscono elementi essenziali ai fini delle decisioni da prendere.

In anni più recenti, il Patto Verde europeo (o Green Deal europeo) contiene una serie di proposte per trasformare le politiche dell'Unione Europea in materia di clima, energia, trasporti e fiscalità in modo da ridurre le emissioni nette di gas a effetto serra di almeno il 55% entro il 2030 rispetto ai livelli del 1990. Il Green Deal mira a ridurre del 50% l'impiego dei prodotti fitosanitari entro il 2030.

## 2. L'assistenza tecnica a supporto delle decisioni fitoiatriche

L'assistenza tecnica al settore agricolo ha, in Italia, una lunga tradizione che iniziò con le Cattedre ambulanti di agricoltura, istituite a partire dalla seconda metà dell'800 per diffondere e applicare le conoscenze agronomiche al mondo rurale. In base a una analisi critica pubblicata da Nardone e Zanni su Agriregionieuropa, nel settembre 2008, l'assistenza agricola ha poi avuto varie evoluzioni, non sempre positive. Nel 1935 le Cattedre furono trasformate in ispettorati provinciali dell'agricoltura, cessando di essere emanazione delle iniziative locali e diventando uffici esecutivi ministeriali; con questa centralizzazione, presero il sopravvento i compiti burocratici a discapito dell'assistenza sul campo. L'alternarsi di decentramento e accentramento proseguì nel dopoguerra con le iniziative legate alla Riforma fondiaria e alla Cassa del Mezzogiorno; partite con ottimi intendimenti, queste iniziative finirono presto per occuparsi per lo più di pratiche burocratiche. Una nuova spinta per lo sviluppo agricolo fu esercitata dall'istituzione delle Regioni e dall'intensificazione degli interventi comunitari che, grazie a un ingente sforzo finanziario, contribuirono alla rapida diffusione della difesa integrata

Era infatti evidente che l'evoluzione dalla lotta a calendario a quella guidata prima, e integrata poi, richiedesse un maggior grado di conoscenze e competenze, non sempre presenti nel bagaglio degli agricoltori. Per questo motivo, la diffusione di queste tecniche fu accompagnata da supporti tecnici che sono andati evolvendosi nel tempo, passando da un'assistenza tecnica diretta a una indiretta, divenuta progressivamente sempre più basata sulle nuove tecnologie dell'informazione e comunicazione (ICT, *Information and Communication Technologies*).

### 2.1. L'assistenza tecnica diretta alle aziende agricole

Negli anni ’80 e ’90, l’assistenza tecnica era impostata tramite visite aziendali con cadenza periodica (spesso settimanale), in cui il tecnico si occupava del monitoraggio e di indirizzare l’azienda verso le migliori soluzioni fitoiatriche. Questo supporto tecnico era fornito dalle Regioni (tramite servizi di sviluppo agricolo, servizi fitosanitari o agenzie partecipate) per mezzo di un coordinamento comprensoriale che si occupava della divulgazione e dell'assistenza tecnica. In Emilia-Romagna, per esempio, erano attivi circa 150 tecnici che seguivano 15 mila ettari di produzioni agrarie. In questa fase, l’assistenza tecnica era fortemente supportata anche da investimenti pubblici in formazione dei tecnici, ricerca e sviluppo sui principali temi di interesse fitoiatrico. Risale a quel periodo l’istituzione della figura del Divulgatore agricolo specializzato che, anche grazie agli interventi comunitari, veniva adeguatamente formato tramite percorsi organizzati dai CIFDA (Consorzi Interregionali per la Formazione dei Divulgatori Agricoli); furono formati, in quegli anni, più di 2000 divulgatori.

Questo modello di assistenza tecnica faceva riferimento a un approccio di tipo *push* della diffusione dell’informazione (termine inglese corrispondente a “spingere”), in cui la conoscenza è portata direttamente da colui che la detiene (il tecnico in questo caso) a colui che ne usufruisce (l’agricoltore). Il tecnico, in quel periodo, aveva anche il ruolo fondamentale di formare gli agricoltori e di dimostrare loro i vantaggi della difesa guidata/integrata rispetto alla difesa a calendario. Ciò con l’obiettivo di renderli via via autonomi nell’adottare le nuove tecniche e prendere decisioni fitoiatriche corrette.

### 2.2. L’assistenza tecnica indiretta e i servizi di avvertimento

A partire dagli anni ’90, l’aumento del numero di imprese agricole in difesa integrata rendeva difficile sostenere un’assistenza basata sulle visite aziendali. Proseguendo con l’esempio dell’Emilia-Romagna, gli ettari in difesa integrata erano aumentati a 170 mila fra la fine degli anni ’90 e i primi del 2000, e questi avrebbero richiesto dai 1300 ai 1500 tecnici quando ne erano operativi circa 400. Nel contempo, con l’assottigliamento dei fondi comunitari, una parte consistente delle attività a sostegno dell’assistenza tecnica era fortemente diminuita, non trovando fonti autonome con cui proseguire. A questa situazione si è fatto fronte potenziando il ruolo del coordinamento centrale dei tecnici e dei servizi da loro erogati, e con un progressivo passaggio al contatto diretto fra il tecnico e l’azienda agricola a un’assistenza tecnica indiretta.

Questa modalità di assistenza tecnica per la difesa integrata è, tutt’oggi, la base dei servizi pubblici, e si basa sue due pilastri: i disciplinari di produzione integrata (DPI) e i bollettini fitosanitari. I DPI contengono informazioni e istruzioni dettagliate, aggiornate annualmente, sui principali elementi decisionali legati alla gestione integrata delle colture, compresa la difesa da malattie, parassiti animali ed erbe infestanti. I DPI contengono principi (consigli e prescrizioni) di carattere generale per la difesa delle colture, e non tengono conto delle condizioni stagionali; tali principi risultano pertanto generici e vaghi, e lasciano pertanto spazio a interpretazioni soggettive. I DPI, infatti, riportano spesso informazioni del tipo: ‘eseguire i trattamenti in presenza di condizioni favorevoli’, ‘intervenire in relazione all’andamento stagionale’, ecc. Indicazioni di questo tipo sono difficili da tramutare in pratiche colturali mirate; è infatti difficile stabilire se e quando si presentano condizioni meteorologiche favorevoli alla comparsa e diffusione di una malattia o di un fitofago, dato che le relazioni che legano gli organismi dannosi alle condizioni meteorologiche sono assai complesse, spesso mediate dalla presenza della coltura, e variabili nel corso della stagione.

I bollettini fitosanitari sono stati (e sono tuttora) uno strumento prezioso per attualizzare alle condizioni colturali e stagionali i principi generali dei DPI. Pur essendo presenti numerose varianti, i bollettini sono documenti che forniscono informazioni circa l'andamento meteorologico e le previsioni per una determinata area geografica (per esempio, una provincia), lo stato di sviluppo e sanitario delle colture, la situazione relativa alla presenza e diffusione delle principali avversità, come pure al rischio fitopatologico, e i consigli di difesa compresi i prodotti fitosanitari impiegabili in base alle regole dei DPI. Nel tempo, i bollettini sono stati messi a disposizione delle aziende agricole attraverso locandine affisse nelle bacheche comunali o nei punti di ritrovo degli agricoltori, periodici locali o quotidiani, ecc., per poi arrivare su Internet. All'opposto del modello di diffusione dell'informazione di tipo *push* citato in precedenza, questo tipo di assistenza tecnica è di tipo *pull* (termine inglese corrispondente a "tirare"), in cui è colui che ha bisogno della conoscenza (l'agricoltore) che va a cercarla laddove colui che la detiene (il tecnico) l'ha riposta. Ciò, ovviamente, presuppone che l'agricoltore sia interessato a investire tempo per andare a reperire l'informazione resa disponibile dal tecnico; ciò è ovviamente vero solo nel caso in cui l'agricoltore sia convinto che l'informazione proveniente dal tecnico gli sia realmente utile.

A partire dagli anni '90, i modelli matematici per la previsione delle malattie e delle infestazioni da fitofagi sono diventati una componente fondamentale per la redazione dei bollettini fitosanitari, con l'obiettivo di individuare tempestivamente i momenti più rischiosi per la coltura ed effettuare gli interventi di difesa in modo mirato. I modelli impiegati per i bollettini, infatti, simulano la comparsa e l'evoluzione di una data malattia o l'andamento dello sviluppo di un determinato fitofago sulla base dei dati meteorologici, oppure definiscono periodi "a prognosi negativa", ossia periodi di tempo in cui è altamente improbabile che la malattia possa comparire.

Lo sviluppo della modellistica a supporto della difesa integrata ebbe grande fermento dagli anni '90 al primo decennio del nuovo millennio. Ne furono testimonianza il convegno "Protezione delle colture: osservazioni, previsioni, decisioni" tenutosi a Pescara nel 1993, le sei edizioni delle "Giornate di Studio sui metodi numerici e i modelli per la difesa delle piante" (Sassari nel 1999, Pisa nel 2002, Firenze nel 2004, Viterbo nel 2007 e Piacenza nel 2009), tutte molto partecipate, e la nascita del GRIMPP (Gruppo di Ricerca Italiano sui Modelli per la Protezione delle Piante) nel 2009, un gruppo che riuniva gli esperti provenienti dall'accademia, dalla ricerca e dai servizi regionali. In una relazione presentata alle Giornate di Studio di Piacenza, furono mostrati i risultati di un'indagine svolta presso i 21 enti regionali impegnati a erogare servizi di assistenza tecnica per la difesa/produzione integrata, da cui si evinceva che erano in uso, nel complesso, modelli per 21 fitofagi e 12 patogeni su colture erbacee (cereali, barbabietola da zucchero e orticole) e arboree (agrumi, drupacee, olivo, pomacee e vite).

Il fermento di quegli anni andò poi scemando, tanto che le Giornate di Studio di Brescia nel 2017 videro una partecipazione decisamente più limitata, nonostante che il PAN (entrato in vigore poco tempo prima) contemplasse che l'allora Ministero delle politiche agricole alimentari e forestali (Mipaaf) provvedesse, fra le altre cose, ad attivare iniziative per la realizzazione e l'applicazione di sistemi di previsione e avvertimento sullo sviluppo delle avversità, da utilizzare a livello regionale. In particolare, il PAN prevedeva la standardizzazione dei modelli previsionali esistenti e in uso in alcune regioni, la messa a disposizione degli enti preposti degli algoritmi dei modelli previsionali sullo sviluppo delle avversità, come pure la validazione dei vari modelli nei diversi ambiti territoriali. Le Regioni e Province autonome, dal canto loro, erano chiamate a mettere in atto le azioni necessarie per assicurare una rete di monitoraggio sullo sviluppo delle principali avversità e di sistemi di previsione e avvertimento

sullo sviluppo delle avversità. Per far fronte a queste necessità, il GRIMPP aveva elaborato un progetto organico per lo sviluppo di una "Piattaforma comune per la modellistica a supporto dell'IPM" (progetto denominato PiCoMod) con l'obiettivo di: 1) mettere a disposizione degli enti pubblici una piattaforma informatica comune tramite la quale accedere, via Internet, ai modelli matematici per malattie, fitofagi e malerbe e ai relativi output; e 2) fornire agli enti pubblici il supporto necessario per impiegare i modelli nell'ambito dei propri servizi di informazione e avvertimento su scala territoriale. Il progetto, che prevedeva anche la copertura finanziaria da parte di Agrofarma, non vide mai la luce per ragioni che esulavano da un contesto tecnico.

Per la redazione dei bollettini sono state sviluppate varie modalità operative. Il sistema dell'Emilia-Romagna ha rappresentato, per lungo tempo, un modello di riferimento. Esso era basato su un coordinamento dei tecnici presenti sul territorio (cui era affidata una rete di monitoraggio e campi spia per seguire l'andamento delle colture e delle avversità), il coinvolgimento del Servizio meteorologico regionale per la fornitura di dati e previsioni meteo, e lo sviluppo di un Sistema di previsione e avvertimento per le avversità delle colture agrarie gestito da un gruppo redazionale facente capo al Servizio fitosanitario. Il Sistema di previsione e avvertimento si basava sull'impiego di oltre 20 modelli matematici messi a punto e validati per il territorio regionale a partire dalla fine degli anni '80 e sull'adozione di uno specifico sistema informatico per operare, giornalmente, i vari modelli. Inizialmente, il Servizio utilizzava il sistema informatico FeCP-DSS realizzato alla fine degli anni '90 dall'Amministrazione di Ferrara con la collaborazione scientifica del Servizio fitosanitario della Regione Emilia-Romagna e dell'Università Cattolica del Sacro Cuore di Piacenza. In seguito, il Servizio si dotò di un proprio sistema informatico, denominato FitoSPA, che forniva aggiornamenti automatici quotidiani, produceva mappe (con un grado di risoluzione di 25 $km^2$) dell'evoluzione degli organismi dannosi, e permetteva una consultazione in autonomia da parte degli utenti accreditati, principalmente i tecnici di produzione integrata. Dal punto di vista organizzativo, un elemento centrale di questo sistema era la presenza delle strutture redazionali provinciali, composte da tecnici esperti nell'interpretazione degli indici forniti dai modelli. Queste strutture avevano il compito di controllare le elaborazioni fornite da FitoSPA, valutare i risultati dei modelli sulla base della conoscenza del territorio di propria competenza e delle informazioni acquisite tramite osservazioni e rilievi di campo, validare le elaborazioni ritenute adeguate e utilizzare gli output dei modelli per la definizione dei bollettini settimanali di produzione integrata e biologica. Il ricorso alla strutture redazionali fondava le sue radici nella considerazione che i risultati dei modelli matematici potevano acquisire valore aggiunto attraverso una lettura contestualizzata al territorio in cui i modelli venivano applicati e all'integrazione, da parte dei tecnici esperti delle conoscenze conseguite con altri mezzi (storia aziendale, dati osservati dai tecnici nelle aziende visitate, monitoraggi specifici, ecc.).

Il servizio FitoSPA è tutt'ora attivo e - dopo l'entrata in vigore della Direttiva 128, e in ottemperanza alla stessa - i risultati dei modelli previsionali sono resi disponibili, oltre che alle strutture redazionali, anche ad altri utenti (tecnici e agricoltori), comunque corredati da commenti e informazioni ritenute utili dalle strutture redazionali.

### 2.3. I sistemi di supporto alle decisioni

Con la metà degli anni 2000 - grazie all'evoluzione della modellistica matematica, la sensoristica ambientale e le tecnologie basate su Internet - hanno iniziato a delinearsi e diffondersi modelli di assistenza tecnica basati sui sistemi di supporto alle decisioni, o DSS (dall'inglese *Decision Support System*).

Punto di svolta per lo sviluppo dei DSS è stato il lavoro  Magarey et al., nel 2002, che ha delineato l'assistenza tecnica del ventunesimo secolo tramite un sistema informatico 'super consulente'. Il super consulente incorpora tutte le soluzioni gestionali per gli agricoltori e fornisce tutte le informazioni che aiutano l'utente a prendere decisioni corrette e tempestive. Il super consulente è accessibile via Internet; un sito web non richiede l'installazione di software nel computer dell'utente, è economico e può essere aggiornato facilmente e continuamente, cosicché le nuove conoscenze acquisite dalla ricerca possono essere trasferite agli agricoltori in tempi molto rapidi, ancora prima di essere pubblicate sulle riviste del settore. Il super consulente si basa su una forte automazione, e permette di prendere in considerazione informazioni sia statiche sia dinamiche: per informazioni statiche si intendono quei fattori, specifici per quella coltivazione, che non subiscono cambiamenti sostanziali durante la stagione colturale (come, ad esempio, la coltura precedente, le caratteristiche del suolo, la specie vegetale e la cultivar); le informazioni dinamiche, al contrario, cambiano continuamente e costituiscono un flusso di misurazioni (ad esempio, i dati meteo) oppure di osservazioni in campo (ad esempio, i risultati di monitoraggio della coltura) che devono essere trasmesse direttamente al sistema.

I DSS sono quindi piattaforme informatiche fruibili via Internet, e sono costituite da quattro componenti principali: 1) un sistema integrato per la raccolta dei dati che caratterizzano l'ambiente colturale (per esempio, i dati misurati da sensori meteo o del suolo, rilevati da satelliti o droni, da fotocamere installate nella coltura, da attività di monitoraggio, o da trappole per insetti, ecc.); 2) l'uso di modelli matematici per l'analisi dei dati; 3) la loro interpretazione alla luce delle conoscenze esperte; 4) la formulazione di un consiglio agronomico, allerte o altre informazioni utili al processo decisionale. La Figura 4 illustra, in modo schematico, il flusso di dati e informazioni di un DSS. Come evidenziato in figura, il flusso di informazioni dall'ambiente colturale, al DSS e quindi all'utente è un circuito senza fine; infatti, ogni operazione colturale cambia lo stato della coltura e, quindi, influisce sulle successive decisioni.

*Figura 1 – Un DSS (Decision Support System) si configura come un sistema integrato che acquisisce dati in tempo reale sullo stato del sistema vigneto, li analizza tramite modelli matematici avanzati e ne*

*fornisce un'interpretazione agronomica a supporto delle decisioni relative alla gestione del vigneto. Le azioni (operazioni colturali) cambiano lo stato del sistema, e questo genera un flusso continuo d'informazioni fra il vigneto e il viticoltore che migliora i processi decisionali e, in ultima analisi, i risultati produttivi ed economici (da Caffi & Rossi, 2018 modificata).*

Questa tipologia di DSS permette di superare molti limiti dei sistemi di assistenza tecnica descritti in precedenza. Essi, infatti, forniscono informazioni dinamiche durante la stagione, con aggiornamenti orari o giornalieri, e con riferimento ai singoli appezzamenti caratterizzati da precessioni colturali diverse, varietà differenti (anche per la suscettibilità agli organismi dannosi) ed eventualmente coltivati con tecniche diverse, compresi i trattamenti fitosanitari. Un DSS si rivolge direttamente all'utente finale (ossia a colui che prende le decisioni fitoiatriche) fornendogli informazioni che si aggiungono al bagaglio di esperienze personali e lo aiutano a prendere decisioni corrette e tempestive per ogni specifica situazione colturale, così come richiesto dai principi dell'IPM. Un DSS abbina approcci *push* (per esempio con l'invio automatico di e-mail o SMS) e *pull* (tramite un'interfaccia grafica che può fornire contenuti multimediali: icone, grafici, mappe, foto e video). I DDS non stravolgono il paradigma alla base dei servizi di avvertimento precedentemente descritti - ossia che tecnici e agricoltori non siano in grado di utilizzare direttamente gli output dei modelli matematici – ma sostituiscono l'intervento dell'esperto (la struttura redazionale di cui al paragrafo precedente) con sistemi automatici di conoscenza esperta. I DSS, quindi, rendono l'assistenza tecnica molto più precisa e tempestiva.

Diverso è l'approccio di altri strumenti informatici che si possono definire sistemi *plug* (inserire la spina), i quali forniscono agli utenti finali l'output dei modelli matematici collegandosi fisicamente con uno strumento installato nel campo, senza alcuna interpretazione di tipo agronomico o fitoiatrico. Il precursore di questa tipologia di strumenti fu la centralina AGREL, prodotta a fine anni '80. Queste centraline, installate in vigneto, raccoglievano dati di pioggia e temperatura e fornivano, su un piccolo schermo, informazioni sui possibili periodi infettivi di *Plasmopara viticola*. Oggi, questi sistemi *plug* si sono evoluti dal punto di vista tecnologico, ma non da quello tecnico. Essi infatti usano Internet per collegarsi alla stazione di rilevamento dei dati in campo (classicamente un stazione agrometeorologica) ma continuano a fornire output grezzi dei modelli, spesso di difficile interpretazione e applicazione da parte degli agricoltori.

Anche se i DSS si rivolgono, di principio, agli agricoltori, vi sono esempi in cui servizi di avvertimento e DSS hanno creato sinergie. Per esempio, il Condifesa TVB (in Veneto) ha sviluppato, in anni recenti, BODI™ (acronimo di "bollettino fitosanitario digitale"), uno strumento innovativo basato su un applicativo (APP) per dispositivi iOS e Android, utilizzabile su tablet e smartphone, che informa i viticoltori sulle condizioni agrometeorologiche del loro areale, sul rischio di sviluppo per le principali malattie e sulla protezione dei trattamenti fitosanitari. L'APP è, di fatto, collegata a un DSS (specificatamente il DSS vite.net®). I tecnici del consorzio, grazie alla conoscenza del territorio, inseriscono nell'applicativo vigneti rappresentativi per le varie aree viticole e li associano a uno dei 120 punti di monitoraggio delle condizioni meteorologiche. I viticoltori, tramite una chiave d'accesso, possono consultare le informazioni in tempo reale su: i) situazione meteorologica degli ultimi sette giorni e previsioni nella settimana a seguire; ii) il livello di rischio fitosanitario in corso e previsto per peronospora, oidio, botrite e black-rot, contestualizzato sulle condizioni ambientali; iii) la fase fenologica del vigneto; iv) la protezione dei trattamenti fitosanitari da loro eseguiti. Scelto il prodotto fitosanitario da una banca dati completa dei prodotti, e inserita la data e l'ora dell'intervento, l'applicativo visualizza il periodo durante il quale il trattamento garantirà la protezione del

vigneto dal patogeno bersaglio, in rapporto alle caratteristiche del prodotto utilizzato, alle condizioni meteo e allo sviluppo della vegetazione. Il sistema è inoltre utilizzato - assieme ad altri strumenti e modelli matematici - da Condifesa TVB per la predisposizione del Bollettino fitosanitario – Agrinotizie che viene settimanalmente inviato ai viticoltori della provincia di Treviso tramite newsletter e servizio postale.

## 3. I modelli matematici

Come introdotto nel paragrafo precedente, lotta guidata e difesa integrata hanno fatto, e continuano a fare, ampio ricorso ai modelli matematici, siano essi inseriti in piattaforme si servizi di previsione e avvertimento, in DSS o in sistemi *plug*. I modelli matematici sono il cuore di questi sistemi, ne determinano la qualità e, quindi, l'utilità; se il sistema di analisi e interpretazione dei dati non è corretto, o non sufficientemente preciso, o non adeguatamente testato sui territori e nei diversi contesti colturali e climatici, allora i consigli fitoiatrici saranno errati, così come le conseguenti decisioni.

La modellistica per la protezione delle colture ha avuto una forte evoluzione, nella quale si possono individuare tre fasi principali: una prima fase pioneristica, che si colloca a metà del secolo scorso; una seconda fase, dominata dall'empirismo, che permane anche oggi seppure con nuove metodologie; una terza fase, con l'avvento dei modelli di processo che hanno significativamente aumentato l'accuratezza e la robustezza dei modelli matematici.

### 3.1. L'era pioneristica

La modellistica fitopatologica è una disciplina ultracentenaria; la sua nascita risale infatti alla metà del secolo scorso, e precisamente ai lavori di Mills sulla ticchiolatura del melo, in cui la durata della bagnatura fogliare e la corrispondente temperatura dell'aria fornivano un rischio d'infezione. Anche la famosa regola dei 3-10 per le prime infezioni stagionali di peronospora della vite (Baldacci, 1947), come pure il calendario d'incubazione di Goidanich (Goidanich et al., 1957), risalgono a questa fase "pioneristica".

### 3.2. I modelli empirici

La modellistica per la difesa delle piante è stata per lungo tempo dominata dall'empirismo. Per sviluppare un modello, si partiva infatti dalle osservazioni di campo per trovare poi relazioni matematiche o statistiche che potessero spiegare le osservazioni sulla comparsa o l'evoluzione della malattia, o lo sviluppo del fitofago, in rapporto ad alcune variabili ambientali, quali la temperatura dell'aria, le precipitazioni o la durata di periodi umidi. Per esempio, il noto modello EPI-Plasmopara (acronimo di État Potentiel d'Infection) - un modello sviluppato da Strizyk nei primi anni '80 nell'areale viticolo di Bordeaux, in Francia - forniva indicazioni sul rischio infettivo della Peronospora della vite attraverso equazioni matematiche che, grazie ad alcuni parametri numerici, confrontavano l'andamento meteorologico stagionale con quello climatico trentennale dell'areale. Anche le note somme termiche utilizzate per descrivere gli stadi di sviluppo dei fitofagi rientrano in questa categoria di modelli, dato che il passaggio in campo degli individui da uno stadio a quello successivo veniva espresso in gradi giorno (calcolati con vari metodi) anziché in numero di giorni. L'approccio empirico è, ancor oggi, predominante. Ovviamente gli strumenti di analisi dei dati di campo e di creazione delle regole

matematiche si è evoluta fino ai giorni nostri in cui si parla, anche con grande enfasi, di *big data analytics* e di intelligenza artificiale.

Indipendentemente da quanto siano evoluti i metodi di analisi dei dati, rimane il problema di fondo dei modelli empirici. In breve, questi modelli fanno una "fotografia" dei dati di campo usati per il loro sviluppo e, pertanto, hanno due grandi limiti. Il primo limite è legato al fatto che la "qualità" del modello dipende dalla rappresentatività, numerosità e precisione dei dati di partenza; di conseguenza, servono grandi quantità di dati e svariati anni di osservazioni per sviluppare un modello attendibile. Il secondo limite sta nel fatto che questi modelli sono spesso privi di significato biologico e non interpretano le relazioni di causa-effetto fra le variabili ambientali e la dinamica delle epidemie o la demografia delle popolazioni dei fitofagi. Ne deriva che i modelli empirici, non sono di norma affidabili quando usati in condizioni diverse da quelle rappresentate nella serie inziale di dati. Le criticità dell'approccio empirico sono oggi ancor più importanti, dato che a causa del cambiamento climatico ogni stagione è diversa dalle precedenti e la storicità degli eventi (e del clima) non costituisce più un riferimento attendibile.

Per gli stessi motivi, i modelli empirici sono trasferibili in realtà ambientali e territoriali diverse da quelle di origine solo dopo una adeguata validazione (ossia di verifica della corrispondenza fra l'output del modello e la realtà del campo) e di calibrazione (ossia di adattamento degli algoritmi di calcolo). Il modello EPI-Plasmopara citato in precedenza è un chiaro esempio delle criticità dell'approccio empirico. Il modello non prende in considerazione le piogge per valutare il rischio infettivo di Peronospora nella stagione primaverile, piogge che, invece, sono indispensabili per la dispersione dell'inoculo dal suolo alla vegetazione; il fatto che il modello sia stato sviluppato in un clima fortemente influenzato dall'Oceano Atlantico, con una media climatica di 20 giorni piovosi e un totale di 150 mm di pioggia in Aprile e Maggio, ha verosimilmente fatto sì che il modello non percepisse come "influente" la presenza di piogge. Ne consegue che la verifica del modello EPI-Plasmopara in tanti areali italiani caratterizzati da condizioni climatiche diverse (dalla Lombardia al  Vento, da Lazio alla Sardegna) ha dato risultati insoddisfacenti e originato una pletora di tentativi di calibrazione che però non hanno mai portato a un impiego diffuso del modello nella pratica fitoiatrica.

### 3.3. I modelli di processo

A partire dagli anni '90, è stato sviluppato un approccio modellistico diverso da quello empirico, chiamato "meccanicistico" o "di processo". Questo approccio consente di superare i limiti dei modelli empirici e di sviluppare, in tempi decisamente più brevi, modelli più informativi, accurati e affidabili. I modelli meccanicistici non sono, infatti, basati su una elaborazione dei dati di campo, ma sulla conoscenza del sistema da modellizzare (costituito da: pianta, organismo dannoso e ambiente), dei processi che lo regolano, e di come il sistema si comporta in rapporto alle variabili esterne (in particolare, quelle meteorologiche, ma non solo). Ciò fa si che i modelli di processo forniscano risultati attendibili nelle più diverse condizioni colturali e ambientali, compreso il cambiamento climatico.

I modelli di processo sono quindi basati su un'analisi dell'effetto delle variabili ambientali e colturali sui vari stadi di sviluppo dell'organismo dannoso, e su come questi organismi passano da uno stadio all'altro attraverso dei tassi e in un determinato intervallo di tempo, secondo flussi regolati da fattori ambientali e colturali. Attraverso l'analisi puntuale di ogni singolo stadio di sviluppo e dei fattori che lo condizionano, si possono così sviluppare sistemi di equazioni tra loro collegate in base a uno specifico diagramma relazionale; a fronte di certi dati di input, questo sistema fornisce degli output relativi a ciascuno stadio dell'organismo dannoso. I

modelli meccanicistici, pertanto, sono molto più complessi ma assai più affidabili e trasferibili di quelli di tipo empirico.

I moderni modelli meccanicistici per le malattie nascono dai lavori di Vanderplank (che, nei primi anni ’60, ha espresso lo sviluppo delle epidemie in termini matematici, facendo ricorso a calcoli sui tassi d’interesse finanziario), dalla scuola dell’Università di Wageningen, in Olanda (che, fra la fine degli anni ’70 e gli anni ’80 hanno introdotto l’analisi dei sistemi allo sviluppo delle colture e dei patogeni) e dal gruppo dell’Università di Piacenza, in Italia (che con i lavori di modellistica sulla Cercosporiosi della barbabietola da zucchero, fra la fine degli ’80 e i primi anni ’90, hanno introdotto un approccio innovativo alla modellistica fitopatologica).

In questi modelli, gli stadi di sviluppo del patogeno rappresentano spesso la struttura base, nella quale il patogeno passa da uno stadio al successivo secondo processi biologici (per esempio, la germinazione delle spore o l’infezione) regolati da fattori ambientali (prevalentemente temperatura, umidità relativa, durata della bagnatura degli organi vegetali e pioggia) e colturali (fasi fenologiche e suscettibilità della pianta). Gli output di questi modelli permettono di individuare i periodi di rischio infettivo in cui la pianta deve essere protetta, come pure periodi a prognosi negativa, in cui gli interventi di difesa non sono necessari. In altri casi, gli stadi di sviluppo fanno riferimento ai tessuti della pianta ospite che, durante l’epidemia, passano dall’essere sani all’essere infetti, con lesioni che sono dapprima non visibili (durante la fase d’incubazione), poi visibili (con la comparsa dei sintomi), infettivi (con la produzione di nuove spore) e, infine, sterili (quando la lesione esaurisce la capacità di produrre spore e contribuire attivamente alla progressione della malattia). Anche in questo caso, i tessuti vegetali passano da uno stadio al successivo attraverso processi regolati dalle condizioni ambientali; gli ouput di questi modelli restituiscono la progressione dell’incidenza e gravità di malattia e permettono così di individuare soglie d’intervento.

I modelli per i fitofagi possono essere fenologici o demografici. I modelli fenologici simulano l'inizio delle varie fasi di vita degli insetti (per esempio, uovo, larva, pupa, adulto), mentre i modelli demografici, o modelli di dinamica della popolazione, prevedono le densità di popolazione di ogni fase della vita. I modelli fenologici sono basati sul fatto che i fitofagi, essendo eterotermi, sono fortemente condizionati dalle temperature esterne; lo sviluppo è possibile solo entro un intervallo di temperature favorevoli, limitate da una soglia termica inferiore e da una superiore. La risposta alla temperatura di ogni fitofago viene, di norma, determinata allevando gli insetti in condizioni ambientali controllate e modellizzata attraverso specifiche equazioni matematiche (per esempio, la nota funzione di Logan). Nella pratica, i modelli più usati sono quelli "a ritardo variabile" (o modelli MRV); essi simulano lo sviluppo di una popolazione di insetti descrivendo il passaggio degli individui attraverso le proprie fasi di vita (o fenofasi) sulla base delle temperature. I modelli MRV tengono in considerazione il fatto che gli individui di una stessa popolazione passano attraverso le stesse fenofasi in tempi diversi a causa della variabilità genetica, microclimatica, nutrizionale, ecc. Per esempio, un gruppo di uova deposte lo stesso giorno e soggette alle stesse condizioni di temperatura, non si schiudono tutte allo stesso momento, ma in un certo intervallo di tempo; nel modello, questa distribuzione nel tempo è ricostruita tramite funzioni stocastiche a partire da un valore medio e da una sua varianza. In Italia, i modelli MRV furono introdotti dall’Università di Bologna e dalla Centrale Ortofrutticola di Cesena, e poi portati avanti dal Servizio fitosanitario regionale di Bologna.

I modelli per le popolazioni dei fitofagi hanno radici molto lontane, che possono essere datate con il lavoro di Fibonacci all’inizio del 1200, il quale descrisse matematicamente la crescita di una popolazione di conigli. Da allora, la storia matematica della dinamica delle popolazioni è

ricca di contributi, da Eulero (che a metà del ‘700 studiò la crescita geometrica delle popolazioni e introdusse la struttura per età della popolazione), a Malthus (che a fine ‘700 considerò la disponibilità di cibo come ostacolo alla crescita geometrica), a Verhulst ( (che nella prima metà dell’800 introdusse l’equazione logistica e un valore massimo per lo sviluppo della popolazione), a Lotka (che all’inizio del ‘900 studiò la relazione tra il tasso di natalità, i tassi di mortalità specifici per età e il tasso di crescita della popolazione, usando un modello a tempo continuo), McKendrick e Kermack (che nei primi decenni del ‘900 studiarono modelli epidemici deterministici), solo per citarne alcuni. Nei modelli demografici, gli individui sono raggruppati in classi di età fisiologiche e gli individui si spostano da una classe all'altra con l'avanzare della loro età; i tassi di sviluppo, fecondità e mortalità degli individui controllano la densità di popolazione di ciascuna classe. Questi processi sono regolati dalle condizioni ambientali (principalmente temperatura, ma anche umidità relativa e fotoperiodo) e colturali (disponibilità dell’ospite e alimentazione), come pure da interazioni con i nemici naturali (i modelli multitrofici basati sulle equazioni preda-predatore di Lotka-Volterra, noti dagli anni ’20 del secolo scorso).

### 3.4 La validazione dei modelli

Tutti i modelli matematici devono essere validati per la loro capacità di interpretare correttamente i fenomeni biologici e le dinamiche degli organismi dannosi (validazione biologica); la validazione biologica consiste nel confrontare, in una molteplicità di situazioni colturali, l’output del modello con la realtà, usando serie di dati indipendenti (ossia non utilizzati per lo sviluppo del modello).

Un altro tipo di verifica è la validazione fitoiatrica. In questo caso, si confronta una strategia di difesa basata sull’uso del modello con quella tradizionale, per verificare che il modello possa dare reali vantaggi nella gestione pratica dell’organismo dannoso.

## 4. L’impiego dei modelli per la difesa delle colture

I modelli, e in particolare quelli di processo, hanno ampiamente dimostrato la loro capacità di simulare in modo corretto la biologia degli organismi dannosi e hanno permesso di migliorare la difesa delle colture. Fornendo informazioni di dettaglio sullo stato dell’organismo dannoso, i modelli anticipano i momenti critici per il suo controllo (per esempio, i periodi infettivi dei patogeni o il raggiungimento di stadi dannosi dei fitofagi), i periodi di probabile comparsa dei sintomi di malattia o dei fitofagi, il raggiungimento di soglie d’intervento, i modelli (specie se all’interno di DSS) hanno consentito di ottimizzare le attività di monitoraggio in campo e la programmazione degli interventi di difesa, sia come tempistica che come tipologia di prodotti da utilizzare per ogni specifico intervento. Ciò si è tradotto in un miglioramento dell’efficacia della difesa e in una riduzione del numero di trattamenti che, in vari casi, ha oscillato dal 30% a oltre il 50%, con evidenti e comprovati vantaggi dal punto di vista della sostenibilità economica, ambientale e sociale.

I modelli di processo, racchiudendo le più aggiornate conoscenze sulla biologia e l’ecologia degli organismi dannosi, hanno anche permesso di rivedere alcuni paradigmi del passato circa le dinamiche fitopatologiche ed entomologiche, e di impostare quindi strategie di difesa più razionali. A titolo di esempio, nel settore viticolo, il ruolo centrale delle infezioni oosporiche nello sviluppo della Peronospora, l’attenzione alle infezioni ascosporiche dell’Oidio e l’importanza del loro controllo, la rivalutazione del periodo a cavallo della fioritura per il

controllo della Muffa grigia sono tutti aspetti innovativi che, dopo le prime "resistenze" da parte del mondo operativo legate a un approccio tradizionale, sono entrate nel patrimonio dei tecnici più preparati e nella pratica delle aziende d'avanguardia.

Oltre ai modelli per gli organismi dannosi, sono stati sviluppati nel tempo anche altri modelli che, combinati ai primi, possono contribuire a migliorare le decisioni fitoiatriche. Si tratta dei modelli per lo sviluppo e la crescita delle piante, che possono essere utili per cogliere in anticipo i periodi di maggiore suscettibilità ai vari organismi dannosi e ai danni da essi arrecati, e i modelli di attività dei fungicidi. Si tratta di modelli che prendono in considerazione il PMoA (*Physical Mode of Action*) dei fungicidi, in particolare il tipo di attività (preventiva, curativa ed eradicante) e la sua durata nel tempo, la cosiddetta *rainfastness* (ossia il tempo che deve intercorrere fra il trattamento e la pioggia affinché il prodotto sia efficace), la tenacità (o resistenza al dilavamento) e la diluizione del prodotto con la crescita della pianta. Questi modelli forniscono informazioni sulla dinamica della protezione fornita da un trattamento fungicida in rapporto alle caratteristiche del fungicida, la dose d'impiego, la crescita della pianta e le condizioni meteorologiche. Essi possono dare risposta alla seguente domanda: ho effettuato il trattamento con un certo fungicida alcuni giorni orsono ed è previsto un imminente periodo infettivo, la vegetazione è già sufficientemente protetta oppure è necessario intervenire nuovamente?

Sono stati sviluppati anche modelli utili per il biocontrollo degli organismi dannosi. Nel settore entomologico i modelli multitrofici hanno, da tempo, permesso di comprendere le dinamiche di sistemi complessi che includono gli antagonisti naturali dei fitofagi. In patologia vegetale, la modellistica dei microrganismi per il biocontrollo è più recente. Si tratta di modelli che tengono conto delle esigenze ecologiche degli di biocontrollo (in termini di risposta alle condizioni meteorologiche) e delle loro interazioni con il patogeno bersaglio. Questa nuova generazione di modelli è stata sviluppata, per esempio, per il biocontrollo della Muffa grigia in vigneto e per il fungo iperparassita di *Erysiphe necator*, *Ampelomyces quisqualis*. Nel primo caso, una volta definita la necessità di un trattamento contro *Botrytis cinerea*, i modelli consentono di scegliere il prodotto microbico con maggiori probabilità di successo in funzione della fase fenologica della vite e, quindi, dall'organo bersaglio (infiorescenze per la prevenzione delle infezioni latenti, residui di fioritura per contenere la colonizzazione fungina e la produzione d'inoculo, bacche in corso di maturazione) e delle condizioni ambientali al momento del trattamento e nei giorni successivi. Nel secondo caso, il modello consente di definire il momento ottimale per le applicazioni di *A. quisqualis*, con l'obiettivo di ridurre la produzione di inoculo svernante dell'oidio. Queste applicazioni "estintive" sono efficaci quando effettuate durante le prime fasi di sviluppo degli organi svernanti del patogeno (i cleistoteci o, meglio, casmoteci); in questo momento, infatti, le condizione ambientali sono più favorevoli ad *A. quisqualis* e il controllo del patogeno (attraverso la parassitizzazione dei casmoteci) è più efficace.

## 5. Le prospettive

I modelli matematici hanno dimostrato di essere uno strumento potenzialmente molto utile per migliorare le strategie di difesa dalle malattie e dai fitofagi delle colture agrarie. Il loro impiego ha infatti portato, in molti casi, a un migliore posizionamento dei trattamenti, con una conseguente maggiore efficacia e una riduzione del numero d'interventi. La scarsa affidabilità e robustezza di vari modelli empirici che, in passato ma purtroppo ancor oggi, vengono utilizzati in servizi di avvertimento, sistemi *plug* e anche in vari DSS sono stati un freno, se non un

ostacolo, alla diffusione dei modelli matematici, ingenerando sfiducia e diffidenza nei confronti di questi strumenti. Nondimeno, i modelli matematici continueranno ad avere un ruolo importante nell'evoluzione della fitoiatria, specialmente all'interno delle soluzioni digitali che vedono una crescente diffusione sia nei servizi pubblici, sia presso i tecnici di consulenza privati, sia nelle aziende agricole.

Le soluzioni digitali non dovrebbero essere viste come alternative all'assistenza tecnica basata sul rapporto personale fra tecnico e agricoltore, bensì come strumenti migliorativi. Il tecnico può infatti avvalersi delle soluzioni digitali per avere una maggiore e più tempestiva conoscenza delle situazioni aziendali, anche da remoto, in modo da interagire con gli agricoltori in modo più puntuale, ottimizzare i programmi di visite aziendali e, in ultima analisi, poter seguire un numero maggiore di aziende. L'agricoltore, avendo una maggiore consapevolezza dello stato sanitario e dei rischi cui le sue coltivazioni sono soggette, può interagire con il tecnico in modo più partecipativo, sfruttando al meglio le ulteriori competenze che il tecnico può fornire.

Così come il passaggio dalla difesa a calendario a quella guidata e integrata ha visto un forte impegno da parte delle amministrazioni pubbliche, così dovrebbe essere per favorire la transizione verso l'uso delle soluzioni digitali. Vi sono, infatti, alcuni ostacoli da superare. In primo luogo, la presunta refrattarietà della categoria dei fruitori (sia tecnici che agricoltori), che unisce elementi oggettivi, quali l'elevata età e il basso livello di digitalizzazione, e aspetti soggettivi di diffidenza e di una certa avversione all'innovazione. Un altro ostacolo è rappresentato, soprattutto per le piccole aziende, dai costi di accesso alle soluzioni digitali. La riduzione dei costi per le aziende è, pertanto, auspicabile tramite adeguate politiche di aiuto economico che includano non solo l'acquisto di hardware ma anche le licenze d'uso dei software. Una riduzione dei costi è anche perseguibile tramite il ricorso a soluzioni che non fanno impiego di dati ambientali rilevati da sensori installati in azienda, ma di dati interpolati sulle coordinate aziendali. I sistemi d'interpolazione dei dati agro-meteorologici - specie quelli che si basano sull'uso dei radar - sono sempre più affidabili e potranno contribuire in modo rilevante alla diffusione delle soluzioni digitali per la difesa del vigneto.

Le soluzioni digitali stanno sempre più trasformandosi in strumenti per la digitalizzazione delle imprese agricole. I DSS, in particolare, stanno ulteriormente evolvendo per fornire supporti non solo per la protezione delle colture, ma per l'intera gestione del sistema colturale, con funzionalità per la concimazione, l'irrigazione e fertirrigazione, la gestione del suolo e della chioma, la previsione della maturazione e delle rese. Allo scopo, i DSS stanno sempre più integrando varie tecnologie dell'Agricoltura 4.0 per acquisire un numero crescente di dati sull'ambiente colturale, con intervalli temporali più brevi e con una maggiore granularità geo-spaziale per meglio cogliere la variabilità entro-coltura. Stanno evolvendo anche per elaborare mappe di prescrizione per interventi a rateo variabile (quali, per esempio, la fertilizzazione), per collegare attuatori per l'automazione di operazioni colturali (quali, per esempio, l'irrigazione) o di robot agricoli.