

DGR n. 1510/2020 Accordo di collaborazione tra la Regione del Veneto e CREA VE finalizzato a diffondere la conoscenza di prodotti e pratiche agronomiche in grado di ridurre l'impiego complessivo di fitofarmaci utilizzati anche avvalendosi di mezzi di biocontrollo o altre sostanze a basso rischio.

Ricognizione e diffusione di strategie di difesa e prodotti innovativi finalizzati alla diminuzione dell'impiego di fitofarmaci in viticoltura

I modelli previsionali applicabili nella difesa da malattie fungine e insetti



UNIVERSITÀ
CATTOLICA
del Sacro Cuore



REGIONE DEL VENETO

Sommario

INTRODUZIONE.....	Errore. Il segnalibro non è definito.
DUE TIPOLOGIE DI MODELLI: EMPIRICI E MECCANICISTICI.....	3
I MODELLI MATEMATICI A SUPPORTO DELLA DIFESA.....	6
I SISTEMI DI SUPPORTO ALLE DECISIONI (DSS).....	7
L'ESEMPIO DI VITE.NET®	8
L'ESEMPIO DI BODI™	9
LE SOLUZIONI DIGITALI PER I VITICOLTORI.....	10
CONCLUSIONI E PROSPETTIVE.....	11
BIBLIOGRAFIA	16

I modelli matematici per la difesa del vigneto: strumenti potenti e affidabili

Introduzione

La difesa delle colture dalle malattie ha subito, negli anni, una profonda evoluzione. I cambiamenti culturali e scientifici hanno determinato un radicale mutamento nella difesa fitosanitaria, passando da metodologie di semplice applicazione, talvolta poco rispettose dell'ambiente, a metodi più complessi e articolati, compatibili con il mantenimento dell'ecosistema e della salute. È sufficiente paragonare il livello di complessità di una difesa basata su un calendario di interventi con uno o pochi fungicidi chimici, distribuiti a turni fissi, con quello di una strategia basata sul rilievo di soglie di intervento, con vari principi attivi anche naturali, alternati fra loro in modo da limitare il rischio di diffusione di popolazioni resistenti di organismi dannosi resistenti ai prodotti fitosanitari.

Il Green Deal europeo ha fissato come obiettivi una riduzione del 50% dell'uso di pesticidi e dei rischi correlati entro il 2030. La Direttiva 128/2009/EC sull'uso sostenibile dei prodotti fitosanitari, nel rendere obbligatoria la difesa integrata da malattie e parassiti su tutto il territorio della Comunità europea, ha indicato (in allegato III) che la difesa delle colture deve essere basata sulla conoscenza degli organismi dannosi nel vigneto, attraverso osservazioni sul campo, sistemi di allerta, previsione e diagnosi precoce. I modelli matematici danno risposta a queste esigenze: sono infatti strumenti capaci di fornire al viticoltore una serie di conoscenze su cui basare le decisioni in merito alla difesa delle colture.

Questa monografia intende fornire un quadro di conoscenze utili al comparto viticolo per una maggiore conoscenza dei modelli matematici, come pure per un impiego più consapevole delle moderne tecnologie basate sull'impiego della modellistica nella difesa del vigneto dagli organismi dannosi.

Due tipologie di modelli: empirici e meccanicistici

In questi ultimi anni il mondo viticolo ha cominciato a prestare attenzione e a conoscere i modelli matematici per la protezione dalle avversità. La modellistica fitopatologica è, in realtà, una disciplina ultracentenaria; possiamo infatti far risalire la sua nascita alla metà del secolo scorso, più precisamente ai lavori di Mills sulla ticchiolatura del melo, in cui la combinazione di durata della bagnatura fogliare e la corrispondente temperatura fornivano un rischio d'infezione. Anche la famosa regola dei 3-10 per le prime infezioni stagionali di peronospora della vite risale a questa fase "pionieristica".

Inizialmente, la modellistica è stata dominata dall'**empirismo**. Si partiva infatti dalle osservazioni di campo per trovare poi regole matematiche che potessero spiegare la comparsa o l'evoluzione della malattia in rapporto ad alcune variabili

I modelli empirici si basano su relazioni matematiche in una serie di dati raccolti in vigneto. Sono modelli spesso privi di significato biologico, poco affidabili quando usati in condizioni diverse da quelle rappresentate nella serie iniziale di dati. *Big data* e intelligenza artificiale sono strumenti per lo sviluppo di modelli di dati, ma soffrono di tutti i limiti tipici dei modelli empirici.

Non utilizzare modelli empirici nella propria realtà senza un'adeguata verifica preliminare.

I modelli meccanicistici si basano sui processi biologici e sulle relazioni che legano questi processi alle variabili ambientali. Sono più precisi e affidabili, capaci di interpretare la variabilità degli effetti delle mutevoli condizioni ambientali sui processi di sviluppo di agenti patogeni e artropodi dannosi.

I modelli meccanicistici sono da preferire ai modelli empirici.

ambientali, quali la temperatura dell'aria, le precipitazioni o la durata di periodi umidi. La regola dei 3-10 per le prime infezioni stagionali di *Peronospora* è l'esempio più noto per questo tipo di modelli. Anche le note somme termiche utilizzate per descrivere gli stadi di sviluppo dei fitofagi rientrano in questa categoria di modelli. L'approccio empirico ha continuato a essere protagonista dei modelli matematici per moltissimi anni e, ancor oggi, è predominante. Ovviamente gli strumenti di analisi dei dati di campo e di creazione delle regole matematiche si è fortemente evoluta fino ai giorni nostri in cui si parla, anche con grande enfasi, di *big data* e intelligenza artificiale. Indipendentemente da quanto siano evoluti i metodi di analisi dei dati, rimane il problema di fondo dei modelli empirici (Rossi et al., 2019). In parole semplici, 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 conseguenza, servono grandi quantità di dati e svariati anni di lavoro per sviluppare un modello attendibile. Il secondo limite sta nel fatto che questi modelli non sono di norma affidabili quando usati in condizioni diverse da quelle in cui sono stati sviluppati. Questo aspetto è particolarmente critico in quest'epoca in cui, a causa del cambiamento climatico, ogni stagione è diversa dalle precedenti. Questo limite deriva dal fatto che i modelli empirici non interpretano dal punto di vista biologico le relazioni di causa-effetto fra le variabili ambientali e la dinamica delle epidemie o la demografia delle popolazioni dei fitofagi. Pertanto, questi modelli sono trasferibili in realtà ambientali e territoriali diverse da quelle di origine solo dopo una adeguata attività di validazione e di calibrazione.

In anni più recenti è stato sviluppato un approccio modellistico diverso da quello empirico, chiamato "meccanicistico" o "di processo", che 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 (costituito da: pianta, organismo dannoso e ambiente) e dei processi da modellizzare, e di come il sistema si comporta in rapporto alle variabili esterne (in particolare, quelle meteorologiche). Ciò fa sì che questi modelli forniscano risultati attendibili nelle più diverse condizioni colturali e ambientali, compreso il cambiamento climatico. I modelli di processo sono basati su un'analisi dell'effetto delle variabili ambientali e colturali sui vari stadi di sviluppo dell'agente patogeno o del parassita, e come questi passano da uno stadio all'altro attraverso dei tassi di sviluppo e in un determinato intervallo di tempo, secondo flussi regolati da fattori ambientali, colturali, genetici e demografici. 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 (Fig. 1); 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.

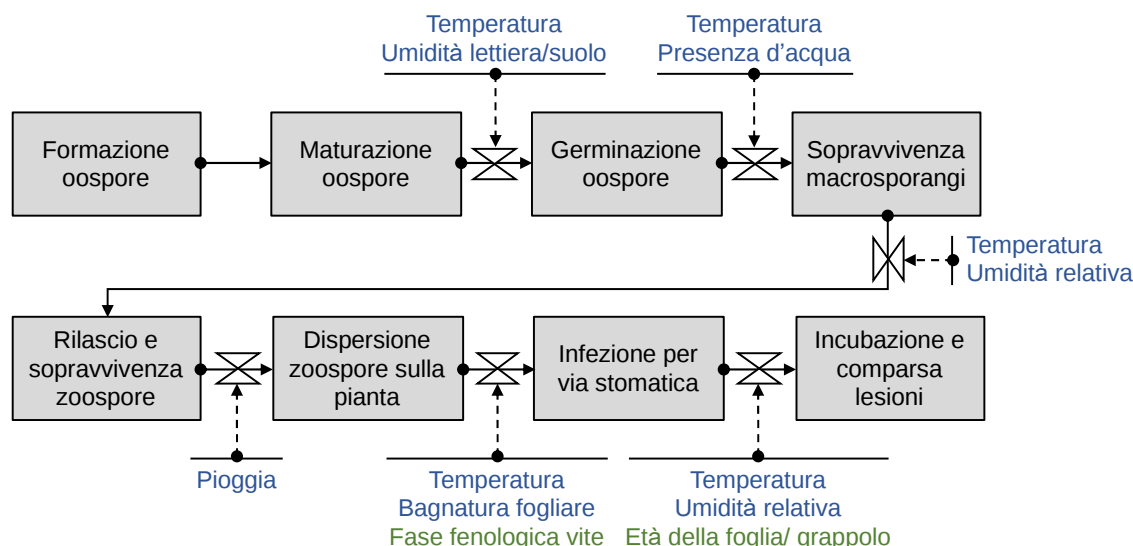


Figura 1. Scomposizione in stadi (rettangoli) del processo che porta alle infezioni primarie di *Plasmopara viticola*. In un modello meccanicistico il passaggio della popolazione del patogeno da uno stadio all'altro (freccie) dipende da tassi (valvole) che sono calcolati tramite equazioni matematiche che dipendono da variabili esterne ambientali e colturali (circoli collegati ai tassi con frecce tratteggiate). Il modello, attraverso il rilievo delle variabili esterne e il sistema di equazioni matematiche è in grado di fornire (giorno per giorno, e in ogni ora del giorno) lo stato del patogeno in ciascun stadio del processo considerato.

Tutti i modelli matematici devono essere validati per la loro capacità di interpretare correttamente i fenomeni biologici e le dinamiche degli organismi dannosi in vigneto (validazione biologica); la validazione biologica consiste nel confrontare, in una molteplicità di situazioni colturali, l'output del modello con la realtà del vigneto (Fig. 2). 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 del vigneto (Fig. 3).

Infezione osservata		predetta	
		No	Si
No		73%	10%
Si		0%	17%

Figura 2 – Validazione biologica del modello Unicatt per le infezioni primarie di *Plasmopara viticola*. Le infezioni predette dal modello sono state confrontate con quelle realmente osservate in 77 vigneti, in varie località e anni.

Il modello è stato accurato nel 90% dei casi, mentre nel 10% ha dato falsi allarmi. Il modello non ha mai commesso l'errore di non segnalare una reale infezione.

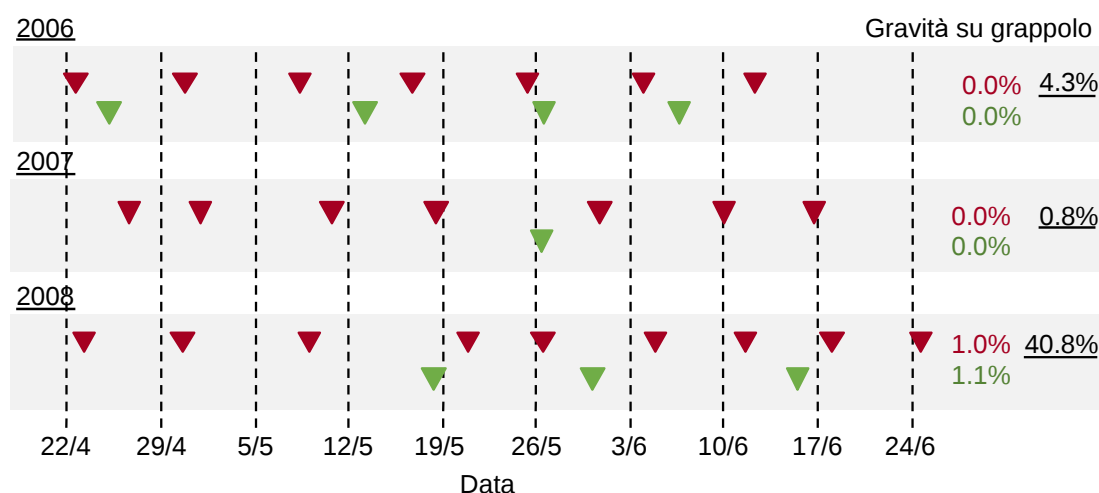
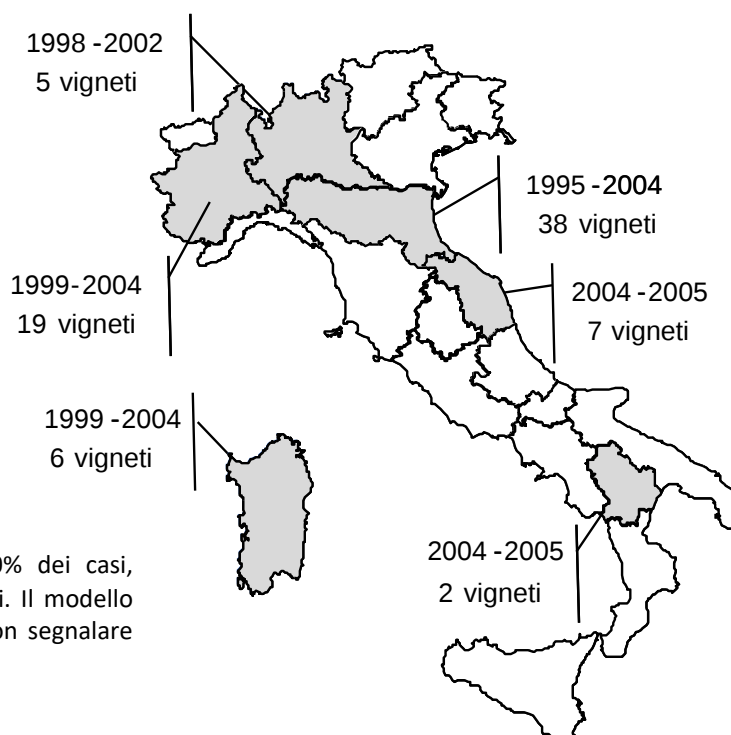


Figura 3. Validazione fitoiatrica del modello Unicatt per le infezioni primarie di *Plasmopara viticola*. In tre annate (2006-2008), sono stati messi a confronto i calendari di difesa aziendali (indicati dalle frecce rosse) con quelli indicati dal modello (frecce verdi). La gravità della peronospora è stata valutata nella fase di ingrossamento bacche come percentuale di superficie del grappolo, sia per i due calendari di difesa (rispettivamente in rosso e verde) sia per il testimone non trattato (in nero, sottolineato). Il modello ha permesso di ridurre del 65% il numero di trattamenti pur mantenendo invariata l'efficacia della difesa.

I modelli matematici a supporto della difesa

I modelli per la difesa della vite vedono oggi due tipologie principali di applicazione pratica. La prima tipologia fa riferimento ai servizi di assistenza tecnica regionali per formulare avvisi e bollettini a scala territoriale, oppure per fornire informazioni direttamente accessibili su Internet dai tecnici e, in alcuni casi, dai viticoltori; il servizio FitoSPA implementato in Emilia-Romagna ne è un esempio (Bettati et al., 2014). La seconda tipologia comprende una serie di soluzioni digitali impiegabili direttamente dai tecnici e dai viticoltori; i sistemi di supporto alle decisioni – o DSS (dall'inglese

Decision Support System) - sono la forma più evoluta di queste soluzioni digitali. I DSS possono essere usati anche dai tecnici per fornire informazioni puntuali e accurate ai viticoltori; un esempio è BODI™, il bollettino fitosanitario digitale del Condifesa TVB (Treviso-Vicenza-Belluno).

I sistemi di supporto alle decisioni (DSS)

La principale modalità di fruizione dei modelli matematici da parte dei singoli viticoltori e dei tecnici è l'impiego di un DSS, una piattaforma informatica fruibile via internet, costituita da tre componenti principali: 1) un sistema integrato di raccolta dei dati in vigneto (per esempio, i dati di monitoraggio, quelli misurati da sensori in vigneto, rilevati da satelliti, droni o veicoli semoventi, ecc.); 2) l'uso di modelli matematici per l'analisi dei dati e la loro interpretazione alla luce delle conoscenze esperte; 3) la formulazione di un consiglio agronomico, allerte o altre informazioni utili a prendere decisioni corrette e tempestive. Un DSS non si sostituisce al tecnico o al viticoltore, ma fornisce loro informazioni aggiuntive per migliorare i processi decisionali relativi alla gestione del vigneto. La Figura 4 illustra, in modo schematico, il flusso di dati e informazioni di un DSS.

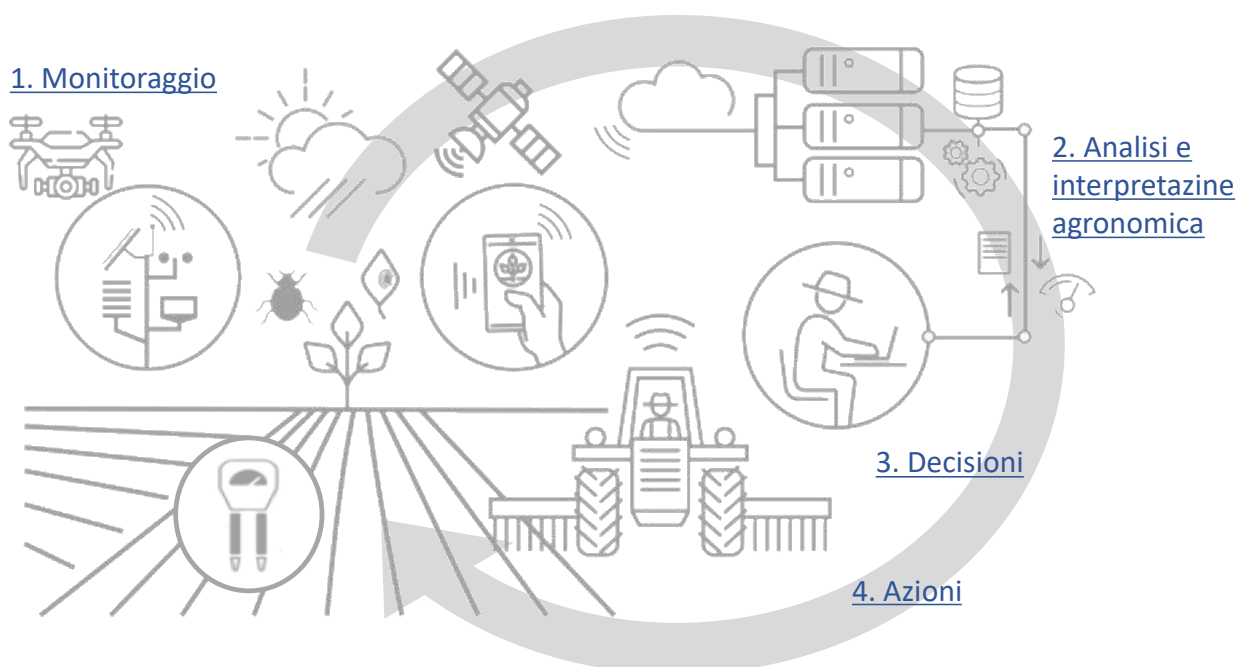


Figura 4 – Un DSS (Decision Support System) si configura come un sistema integrato che acquisisce dati in tempo reale sullo stato del sistema vigneto, li analizza tramite modelli matematici avanzati e ne fornisce un'interpretazione agronomica a supporto delle decisioni relative alla gestione del vigneto. 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).

I modelli matematici sono il cuore dei DSS, ne determinano la qualità e, quindi, l'utilità; se il sistema di analisi e interpretazione dei dati rilevati in vigneto non è corretto, o non sufficientemente preciso, o non adeguatamente testato sui territori e nei diversi contesti colturali e climatici, allora i consigli agronomici saranno errati, così come le conseguenti decisioni. Sotto questo punto di vista, il DSS vite.net® di Hort@ è oggi il sistema più completo per la difesa del vigneto, e per questo viene qui riportato a titolo di esempio.

L'esempio di vite.net®

Il DSS vite.net® si basa sui modelli di processo sviluppati dalla ricerca svolta presso l'Università Cattolica del Sacro Cuore (di seguito Unicatt) negli ultimi 20 anni; si tratta di modelli per: peronospora (infezioni primarie e secondarie di *Plasmopara viticola* (Berk. & M.A. Curtis) Berl. & De Toni), oidio (infezioni ascosporiche e conidiche, infezione delle gemme e maturazione dei casmoteci di *Erysiphe necator* Schw.), muffa grigia (*Botrytis cinerea* Pers.), black-rot (*Guignardia bidwellii* (Ellis) Viala & Ravaz) e antracnosi (*Elsinoë ampelina* Shear) (Rossi et al., 2008; Caffi et al., 2011; Legler et al., 2011; Rossi et al., 2015; Gonzalez-Dominguez et al., 2015; Ji et al., 2020; Brischetto et al., 2021). Sono in corso di sviluppo anche modelli per altre malattie di grande importanza, come il Mal dell'esca e le altre malattie del legno della vite, oppure per ampelopatie di crescente interesse e diffusione, come l'escoriosi (*Diaporthe ampelina*, Gomes et al. 2013), la carie bianca (*Coniella diplodiella* (Speg.) Petr. & Syd.) e il marciume acido (causato da vari agenti microbici).

Questi modelli racchiudono tutte le più recenti conoscenze sulla biologia ed epidemiologia degli agenti patogeni, e forniscono informazioni di dettaglio sulle loro dinamiche: dall'evoluzione e disponibilità dell'inoculo, al verificarsi delle infezioni, alla dinamica dell'incubazione fino alla comparsa dei sintomi. Queste conoscenze hanno peraltro permesso di rivedere alcuni paradigmi del passato circa le dinamiche fitopatologiche e d'impostare, quindi, strategie di difesa più razionali. Il ruolo centrale delle oospore e delle numerose infezioni primarie che ne derivano 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, anche grazie al DSS.

Per quanto concerne i fitofagi del vigneto, sempre rimanendo nel contesto dei modelli di processo, vite.net® si avvale di un modello demografico generico (Gilioli et al., 2016) che, sulla base dei dati meteorologici e in base a calibrazione specie-specifiche, permette di definire il numero delle generazioni, la loro successione e la dinamica dei diversi stati di sviluppo (per esempio, uovo, larva, pupa, adulto) per un qualsiasi artropode, includendo anche i fenomeni di diapausa, fecondità e mortalità. Il modello, a oggi, è stato calibrato e testato per *Planococcus ficus* Signoret, *Scaphoideus titanus* Ball e *Lobesia botrana* Denis & Schiffermüller.

Il DSS vite.net®:

- integra varie fonti d'informazione e sensori (per *proximal* e *remote sensing*) per produrre avvisi e allarmi semplici e intuitivi;
- si interfaccia con oltre 50 marche di stazioni agro-meteo e con dati interpolati sulle coordinate aziendali;
- dal 2011, su oltre 8 mila vigneti (circa il 20% in Veneto), circa 70 mila ettari, in 19 regioni e altri Paesi;
- utilizzato tal quale (o tramite scambio di dati via web-service) dai servizi regionali in Val d'Aosta, Piemonte, Emilia-Romagna, Lombardia (APP protetto), Marche e Basilicata.

Nel DSS sono inseriti anche altri modelli matematici che possono contribuire a migliorare le strategie di difesa in vigneto. Si tratta dei modelli per lo sviluppo e la crescita della vite - che possono essere utili per cogliere in anticipo i periodi di maggiore suscettibilità delle piante alle varie malattie - e i modelli di attività dei fungicidi. Questi ultimi, sempre sviluppati in Unicatt, permettono di conoscere la 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 meteo. Questi modelli possono dare risposta alla domanda: ho effettuato il trattamento con un certo fungicida alcuni

giorni orsono ed è previsto un imminente periodo infettivo, la vegetazione è sufficientemente protetta oppure è necessario intervenire nuovamente? Nel DSS è anche presente un database completo e aggiornato dei prodotti fitosanitari autorizzati per la difesa della vite, con funzionalità per la ricerca dei prodotti più adatti per le specifiche applicazioni.

Il DSS è stato ampiamente collaudato per la sua capacità di simulare in modo corretto la biologia dei patogeni e per la sua utilità nel migliorare le strategie di difesa; fornendo informazioni a diverso livello di dettaglio sullo stato del patogeno nel vigneto, i modelli anticipano i momenti critici per il controllo della malattia (per esempio, i periodi infettivi) e i periodi di probabile comparsa dei sintomi di malattia. Gli output del DSS possono pertanto essere usati per ottimizzare le attività di monitoraggio in campo e per programmare gli interventi di difesa, sia come tempistica che come tipologia di prodotti da utilizzare per lo specifico intervento.

L'uso dei DSS permette a tecnici e viticoltori di avere una maggiore consapevolezza delle dinamiche di sviluppo delle avversità del vigneto e di prendere decisioni informate e tempestive, sia sulle tempistiche degli interventi di difesa sia sui prodotti più idonei per ciascuna specifica applicazione. Ciò si traduce in un miglioramento dell'efficacia della difesa, in una riduzione del numero di trattamenti - che nelle medie pluriennali va dal 30 a oltre il 60% (Fig. 4) – con evidenti vantaggi dal punto di vista della sostenibilità economica, ambientale e sociale.

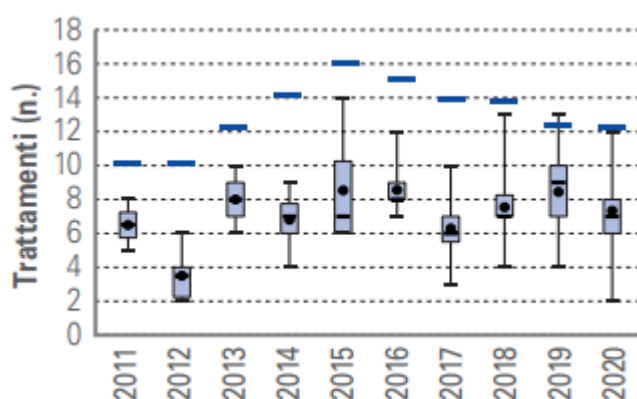


Figura 4 - Trattamenti antiperonosporici effettuati in 352 vigneti dei colli Piacentini fra il 2011 e il 2020 utilizzando il DSS vite.net®. La variabilità fra vigneti entro ciascun anno è rappresentata dai box-plot, in cui il cerchio nero indica la media, la scatola il 50% dei casi e i baffi gli estremi minimo e massimo. Le linee blu indicano il numero di trattamenti eseguiti in base ai bollettini di produzione integrata emessi da Consorzio Fitosanitario di Piacenza.

L'esempio di BODI™

BODI™, acronimo di “bollettino fitosanitario digitale”, è uno strumento innovativo per i soci del Condifesa TVB, sviluppato nell'ambito del Programma di sviluppo rurale per il Veneto 2014-2020 (<https://www.condifesatvb.it/bodi/>). Si tratta di una applicazione semplice e intuitiva, disponibile per dispositivi iOS e Android, per 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.

I tecnici del Condifesa TVB, grazie alla profonda conoscenza del territorio, inseriscono nel DSS vite.net® 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'applicazione visualizza il periodo durante il quale il trattamento garantirà la protezione del vigneto dal patogeno target, in rapporto alle caratteristiche del prodotto utilizzato, alle condizioni meteo e allo sviluppo della vegetazione. Nel 2020, l'applicazione è stata utilizzata da circa 300 utenti. I DSS vite.net® è inoltre utilizzato - assieme ad altri strumenti e modelli - da Condifesa TVB per la predisposizione del Bollettino fitosanitario – Agrinotizie che viene settimanalmente inviato a 6.000 viticoltori della provincia di Treviso tramite newsletter e servizio postale.

I viticoltori che hanno impiegato BODI™ a supporto della loro gestione fitosanitaria hanno confermato di aver acquisito una maggiore consapevolezza di quello che accade nei loro vigneti ed in particolare di poter monitorare in tempo reale la copertura fornita dai prodotti fitosanitari nello specifico contesto meteorologico e fenologico. Questo ha consentito loro di ottimizzare la difesa sia dal punto di vista dell'impatto ambientale che economico. L'applicazione, infatti, aiuta a posizionare correttamente i trattamenti e a scegliere il prodotto che, a parità di copertura, ha un impatto minore in chiave di sostenibilità (Filippo Codato, comunicazione personale).

Le soluzioni digitali per i viticoltori

In anni recenti, lo sviluppo delle tecnologie IoTs (internet delle cose), della sensoristica avanzata montata su veicoli agricoli, satelliti e droni, *Big data* e intelligenza artificiale, insieme all'affermarsi di concetti quali agricoltura sostenibile, smart e di precisione, hanno dato impulso allo sviluppo di soluzioni digitali. Parliamo qui di "soluzioni" e non solo di DSS, dato che varie offerte digitali per le aziende viticole mancano della fase chiave di un DSS, ossia l'interpretazione automatica degli output dei modelli matematici e di un adeguato consiglio agronomico.

Come spesso accade quando l'innovazione corre veloce, si crea molta "confusione" e può essere difficile orientarsi nelle scelte. È però importante andare oltre quanto viene reclamizzato; di seguito, alcune linee guida.

Una attenta valutazione della "qualità" dei modelli matematici implementati nella soluzione digitale è certamente il punto di partenza; se i modelli non sono affidabili, o non sufficientemente testati nei vari areali viticoli, la soluzione digitale (per quanto accattivante possa essere) non fornirà un supporto utile alla difesa. È quindi consigliabile "diffidare" delle cosiddette "black box", ossia di quelle soluzioni che non dichiarano in modo trasparente l'origine e le credenziali dei modelli utilizzati, e (per le ragioni che abbiamo spiegato precedentemente) delle soluzioni che usano modelli empirici; "diffidare", nel contesto di questa monografia, significa che le soluzioni devono essere testate e validate nella propria realtà aziendale prima di essere impiegate su larga scala.

Prima di scegliere una soluzione digitale sarebbe poi importante fare verifiche con chi già la utilizza nel proprio territorio. Anche le seguenti domande possono essere utili nell'orientare la scelta.

- Quale è il core-business dell'azienda? Servizi di consulenza agronomica? Vendita di stazioni meteorologiche? Vendita macchine e/o componenti per l'agricoltura di precisione? Vendita di mezzi tecnici (prodotti fitosanitari, fertilizzanti, ecc.)? Viene fornita un'assistenza sul campo all'uso della soluzione digitale?
- La soluzione digitale è a livello di sviluppo, di prototipo o commerciale? Se è commerciale, da quanti anni è sul mercato? Quanti sono gli utilizzatori? In quali aree geografiche?
- Il produttore ha competenze specifiche di tipo agronomico e sulla modellistica degli organismi dannosi? Quali sono i modelli matematici impiegati? Sono esplicitati e documentati? Sono state effettuate delle validazioni? Ne sono disponibili/reperibili gli esiti?

In Tabella 1 sono illustrate alcune soluzioni digitali oggi disponibili per i viticoltori; non sono riportate soluzioni sviluppate (o in corso di sviluppo) nel solo ambito di ricerca.

Le prime soluzioni sono quelle erogate da società di servizio, il cui scopo principale è quello di fornire assistenza qualificata a supporto dei viticoltori, singoli o associati. Si tratta di soluzioni di norma interfacciabili con vari modelli di stazioni agro-meteo che possono essere presenti in loco, e che prevedono un'assistenza da remoto o in azienda per consentire al viticoltore di utilizzare al meglio la soluzione e le sue funzionalità. I modelli possono essere di tipo meccanicistico o empirico, e a volte non sono specificati (black box).

Seguono le soluzioni fornite da aziende che vendono componenti hardware (in particolare stazioni agro-meteorologiche, altri sensori ambientali, trappole digitali per insetti, ecc.), oppure che vendono sia stazioni agro-meteo e sensori sia piattaforme informatiche. Tutte queste aziende hanno il focus sulla vendita delle componenti hardware piuttosto che sulla fornitura di servizi specifici per la difesa delle colture, tanto che spesso non offrono piattaforme dedicate alla viticoltura, ma solo alcuni modelli/moduli dedicati al vigneto. I modelli matematici sono fruibili solo in abbinamento alla specifica stazione agro-meteo. Queste aziende normalmente implementano nelle loro piattaforme modelli di letteratura, facendo quindi un lavoro prettamente informatico. È però molto importante sottolineare che i modelli disponibili in letteratura, specie quelli più complessi, non vengono normalmente pubblicati per intero a causa di limitazioni redazionali imposte dalle riviste; pertanto, i modelli implementati a partire dalla letteratura non riescono a riprodurre esattamente i modelli originali. Peraltro, i modelli di letteratura non sono mantenuti e aggiornati; pertanto, sono modelli datati, che non tengono conto delle progressive conoscenze acquisite dalla ricerca. L'esempio più semplice è quello della regola dei 3-10, che non considera gli studi relativi all'effetto delle piogge (inferiori a 10 mm) nella dispersione delle zoospore di *P. viticola* (Rossi & Caffi, 2012).

Seguono infine le soluzioni commercializzate da produttori di mezzi tecnici, o da realtà che vendono mezzi tecnici. Queste soluzioni hanno molti punti in comune con quelle offerte dalle società di servizio.

Conclusioni e prospettive

I modelli matematici sono uno strumento potenzialmente molto utile per migliorare le strategie di difesa dalle malattie e dai parassiti del vigneto; il loro impiego porta infatti a un migliore posizionamento dei trattamenti che si traduce in una maggiore efficacia e in una riduzione del numero d'interventi. La scarsa affidabilità di vari modelli che in passato - e in alcuni casi ancor oggi - vengono proposti sono stati un freno, se non un ostacolo, alla diffusione dei modelli, ingenerando sfiducia e diffidenza nei confronti di questi strumenti. Nondimeno, l'interesse rimane alto per quei modelli che hanno dimostrato di fornire informazioni accurate e robuste, e le soluzioni digitali (in particolare i DSS) che si basano su questi modelli hanno una crescente diffusione sia nei servizi pubblici, sia presso i tecnici di consulenza privati, sia nelle aziende vitivinicole.

I costi di accesso alle soluzioni digitali - seppure non eccessivi e ampiamente ripagati dai vantaggi di tipo economico - possono ancora rappresentare un ostacolo, soprattutto per i piccoli viticoltori e quando si rende necessario installare anche una stazione agro-meteorologica in azienda. La riduzione dei costi per le aziende è, pertanto, auspicabile tramite adeguate politiche di aiuto economico alle aziende che includano non solo l'acquisto di hardware ma anche le licenze d'uso dei software. Il Piano di Sviluppo Rurale del Veneto prevede tra le spese ammissibili del tipo intervento 4.1.1 "Investimenti per migliorare le prestazioni e la sostenibilità globali dell'azienda" anche

l'acquisto di hardware e software finalizzati all'adozione di tecnologie di informazione e comunicazione (TIC), nelle quali possono rientrare i DSS.

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 vigneto, 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 vigneto, con intervalli temporali più brevi e con una maggiore granularità geo-spaziale per meglio cogliere la variabilità entro-vigneto. 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. È evidente che, in questo contesto, la fase di analisi e interpretazione automatica dei dati sull'ambiente vigneto diventa sempre più rilevante.

Tabella 1 – Principali caratteristiche delle soluzioni digitali per la difesa del vigneto, con particolare riferimento ai modelli matematici che, di queste soluzioni, rappresentano il motore.

Nome, produttore e diffusione ¹	Fenologia della pianta e avversità	Tipo di modello matematico	Trattamenti	Altre informazioni
Società di servizio				
vite.net® Hort@ S.r.l., spin off di Unicatt Diffusione: 4	Fenologia (calibrato sulle varietà) Peronospora Oidio Muffa grigia Black-rot <i>Escoriosi</i> <i>Mal dell'esca</i> <i>Antracnosi</i> <i>Carie bianca</i> Tignoletta Cocciniglia farinosa Scafoideo	Modelli meccanicistici originali sviluppati da Unicatt (vedi rif. bibliografici nel testo)	Il DSS ha un database completo dei prodotti fitosanitari, con chiavi multiple di ricerca e scelta. È presente un modello matematico che fornisce informazioni circa il livello di protezione di un trattamento effettuato.	I modelli sono pubblicati su riviste scientifiche. Disponibile ampia informazione su validazione e uso fitoiatrico (Caffi et al., 2010; Franchi et al., 2010; Bortolotti et al., 2012; Caffi et al., 2012; Morroni et al., 2012; Rosi et al., 2014; Benvenuto et al., 2015; Butinar & Sivilotti, 2015a e 2015b; McKay & Taylor, 2018). Nella versione 2021, i modelli in corsivo sono in fase di test e, pertanto, forniti solo ad alcuni viticoltori.
GRAPEDSS Agriculus S.r.l. Diffusione: 1	Peronospora Oidio Muffa grigia Tignoletta	Black box	-	Non è stato possibile reperire informazioni sui modelli e su eventuali validazioni.
RIMpro RIMpro B.V. Diffusione: 0	Peronospora Oidio	Black box	È presente un'indicazione sulla persistenza dei prodotti impiegati	Il modello per peronospora è stato testato in Trentino-Alto Adige, Veneto e FVG. In prove comparate in Veneto ha fornito risultati paragonabili a vite.net®. Non risulta una rete di vendita diretta in Italia. La soluzione è fornita in abbinamento ad alcune stazioni meteo.
Vitimeteo Geosens Diffusione: 0	Fenologia (per Riesling, Müller-Thurgau e Spätburgunder) Peronospora Oidio Black-rot Tignoletta Eupoecilia ambiguella Hyalothecium obsoletus	Modelli empirici da letteratura (Kast & Bleyer, 2009; Molitor, 2009; Bleyer et al., 2003; Schultz, 1992)	-	I modelli sono empirici, ben documentati. Il modello è stato testato in Trentino-Alto Adige. In prove comparate in FVG ha fornito risultati paragonabili a vite.net® (Benvenuto et al., 2015; Butinar & Sivilotti, 2015a e 2015b). Non risulta una rete di vendita in Italia.
Società che producono componenti hardware				

Fieldclimate PESSL instruments Diffusione: 2	Peronospora Oidio Muffa grigia Back-rot Antracnosi Tignoletta	Modelli empirici da letteratura (Denzer, 2002; Milonas et al., 2001; Gubler et al., 1999)	-	I modelli sono forniti in abbinamento alle stazioni Metos; si basa su modelli empirici da letteratura, parzialmente documentati. Non sono state reperite informazioni su eventuali validazioni.
Elaisian S.r.l. Diffusione: 1	Peronospora Oidio Muffa grigia Tignoletta	Black box	-	Non è stato possibile reperire informazioni sui modelli e su eventuali validazioni.
Vinesense Netsens S.r.l. Diffusione: 2	Fenologia Peronospora Oidio Muffa grigia Tignoletta Frankliniella	Black box	E' presente una funzione per il dilavamento dei prodotti fitosanitari	Non è stato possibile reperire informazioni sui modelli e su eventuali validazioni.
Digiteco S.r.l. Diffusione: 1	Peronospora Oidio Muffa grigia Tignoletta	Modelli empirici da letteratura (Baldacci et al., 1947; Goidanich et al., 1957; Bulit et al., 1970; Strizyk, 1981; Vogt & Schruft, 2000)	-	Non è stato possibile reperire informazioni su eventuali validazioni.
Agrismart Neetra S.r.l. Difusione: 1	Peronospora Oidio Muffa grigia Tignoletta Frankliniella	-	-	Le avversità elencate vengono dichiarate come "monitorabili". Non è stato possibile reperire informazioni sui modelli e su eventuali validazioni.
Xfarm Diffusione: 1	Peronospora Oidio Muffa grigia	Black box	Viene fornito il grado di protezione garantito dall'ultimo trattamento (solo per alcune avversità). Corredato di un modulo per visualizzare i prodotti fitosanitari e i dosaggi.	E' disponibile una versione di base gratuita, in cui però non sono inclusi i moduli per la difesa. Il materiale promozionale indica "molte altre avversità", non meglio specificate Non è stato possibile reperire informazioni sui modelli e su eventuali validazioni.
Idroplan Diffusione: 1	Peronospora Oidio Muffa grigia	Black box	Viene fornito il grado di protezione garantito dall'ultimo trattamento	Non è stato possibile reperire informazioni sui modelli e su eventuali validazioni.

SAVE GRAPE IOT Solutions S.r.l. Diffusione: 1	Peronospora Oidio Muffa grigia	Black box	-	Non è stato possibile reperire informazioni sui modelli e su eventuali validazioni.
Società che vendono mezzi tecnici (prodotti fitosanitari)				
Agrigenius Vite BASF Diffusione: 3	Fenologia (calibrato per varietà) Peronospora Oidio Muffa grigia Black-rot Tignoletta Cocciniglie Scafoideo	Modelli meccanicistici sviluppati da Unicatt	Il DSS ha un database completo dei prodotti fitosanitari, con chiavi multiple di ricerca e scelta. È presente un modello che fornisce informazioni circa il livello di protezione di un trattamento effettuato	Esistono le versioni: Pro e Tech destinate a aziende strutturate e tecniche; Go per aziende che cercano una versione semplificata del servizio.
Movida Bayer Diffusione: 1	Fenologia Peronospora Oidio	Black box	È presente un modulo che simula l'efficacia della copertura nel tempo	La soluzione è stata messa a punto e trova una certa diffusione in Francia. Non è stato possibile reperire informazioni sui modelli e su eventuali validazioni.
Agronomica 3.0 Coop. Terremerse Diffusione: 1	Peronospora Oidio Muffa grigia Tignoletta	Black box	-	I modelli sono definiti come meccanicistici, ma non è stata trovata documentazione in merito. Non è stato possibile reperire informazioni su eventuali validazioni.

¹ Le informazioni sono desunte dal materiale disponibile in rete (principalmente sui siti dei produttori), su articoli e dépliant informativi; non si escludono pertanto imprecisioni dovute alla scarsità o incompletezza delle informazioni reperibili. La diffusione fa riferimento al numero di realtà viticole che utilizzano il sistema e della loro diffusione territoriale; è stimata in modo soggettivo dagli autori sulla base delle informazioni reperibili su Internet, dei pareri di una fitta rete di tecnici viticoli, della conoscenza della realtà sui vari territori viti-vinicoli, e varia da 1 (poche unità di utenti, diffusione localizzata) a 4 (centinaia di utenti sull'intero territorio nazionale); la notazione "0" indica che la soluzione non ha (o non è nota) una rete di vendita in Italia.

Bibliografia

- Baldacci, E. (1947). Epifitie di *Plasmopara viticola* (1941-1946) nell'Oltrepò Pavese e adozione del calendario d'incubazione come strumento di lotta. Atti Istituto Botanico, Lab. Crittogamico, VIII: 45-85;
- Benvenuto, L., Malossini, G., & Stocco, M. (2015). Studio e utilizzo di alcuni modelli previsionali della peronospora della vite nei vigneti del Friuli Venezia Giulia. *Notiziario ERSA* 1, 21-25
- Bettati, T., Ilic, M., Bugiani, R., Butturini, A., Galassi, T., Tiso, R. (2014). Con FitoSPA malattie e insetti sotto controllo nei campi. *Quaderno Agricoltura Emilia-Romagna*, giugno 2014, 59.
- Bleyer G., Huber B., Steinmetz V. and Kassemeyer H.-H., 2003: Growth-models, a tool to define spray intervals against downy mildew (*Plasmopara viticola*); IOBC/wprs Bulletin Vol. 26 (8), 7-12
- Bortolotti, P. P., Nannini, R., & Bugiani, R. (2012). Applicazioni di campo del modello previsionale per peronospora della vite (*Plasmopara viticola*). In ATTI Giornate Fitopatologiche 2012 (pp. 401–404).
- Brischetto, C., Bove, F., Fedele, G., Rossi, V. (2021). A Weather-Driven Model for Predicting Infections of Grapevines by Sporangia of *Plasmopara viticola*. *Frontiers in Plant Science*, 12, Article 636607.
- Bulit J, Lafon R, Guillier G. Périodes favorables a l'application de traitements pour lutter contre la pourriture grise de la vigne. *Phytiatrie-Phytopharmacie*. 1970;19: 159–165.
- Butinar, L., & Sivilotti, P. (2015a) Applicazione di bassi dosaggi di rame e strategie alternative per il controllo della peronospora (*Plasmopara viticola* Berl & Curtis, Berlese et De Toni) della vite. *Viticultura Sostenibile e valorizzazione delle risorse territoriali nella filiera vinicola*, 18, 75.
- Butinar, L., & Sivilotti, P. (2015b) Vini di Territorio Sostenibili (VTS): Applicazione su scala aziendale di un approccio integrato tra strategie di difesa e supporto dei DSS in Friuli Venezia Giulia. *Viticultura Sostenibile e valorizzazione delle risorse territoriali nella filiera vinicola*, 81.
- Caffi, T., & Rossi, V. (2018). Fungicide models are key components of multiple modelling approaches for decision-making in crop protection. *Phytopathologia Mediterranea*, 57(1), 153-169.
- Caffi, T., Legler, S. E., Rossi, V., Bugiani, R., Cattolica, U., & Pathology, P. (2012). Evaluation of a Warning System for Early-Season Control of Grapevine Powdery Mildew. *Plant Disease*, 96(1), 104–110.
- Caffi, T., Rossi, V., & Bugiani, R. (2010). Evaluation of a Warning System for Controlling Primary Infections of Grapevine Downy Mildew. *Plant Disease*, 94, 709–716.
- Caffi, T., Rossi, V., Legler, S. E., & Bugiani, R. (2011). A mechanistic model simulating ascospore infections by *Erysiphe necator*, the powdery mildew fungus of grapevine. *Plant Pathology*, 60(3), 522–531.
- Denzer, H. (2002). Infection models for downy mildew fungi used in different crops with focus on *Plasmopara viticola*. Seventh Workshop of an European Network for development of an Integrated Control Strategy of potato late blight. Poznan, Poland, 2-6 October 2002
- Franchi, A., Bugiani, R., & Barani, A. (2010). Forecasting models: a help against downy mildew of grapevine." *Informatore Agrario Supplemento* 66.21, Supplemento: 5-8.
- Gilioli, G., Pasquali, S., Marchesini, E., & Salinari, F. (2012). Simulation models - insect pests, (November), 1–3.
- Goidanich, G., Casarini, B., Foschi, S. (1957). Lotta antiperonosporica e calendario di incubazione. *Giornale di Agricoltura*, 13 gennaio: 11-14;
- Gomes, R.R., Glienke, C., Videira, S. I., Lombard, L., Groenewald, J. Z., & Crous, P. W. (2013). *Diaporthe*: a genus of endophytic, saprobic and plant pathogenic fungi. *Persoonia*, 31, 1–41.
- González-Domínguez, E., Caffi, T., Ciliberti, N., & Rossi, V. (2015). A Mechanistic Model of Botrytis cinerea on Grapevines That Includes Weather, Vine Growth Stage, and the Main Infection Pathways. *Plos One*, 10(10), e0140444. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0140444>
- Gubler, W.D., Rademacher, M.R. and Vasquez, S.J. (1999). Control of powdery mildew using the UC Davis powdery mildew risk index." *APSnet Features*. Online. doi: 10.1094/APSnetFeature-1999-0199
- Ji, T., Caffi, T., Carisse, O., Li, M., & Rossi, V. (2020). Development and evaluation of a model that predicts grapevine anthracnose caused by *Elsinoë ampelina*. *Phytopathology*. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-07-20-0267-R>
- Kast, W. K.; Bleyer, K.: The expert system OiDiag-2.2. - a useful tool for the precise scheduling of sprays against powdery mildew of vine (*Erysiphe necator* Schwein.), IOBC/WPRD IOBC/WPRS Working group "Integrated Protection and Production in Viticulture", Staufen, 2009

- Legler, S. E., Caffi, T., & Rossi, V. (2011). A nonlinear model for temperature-dependent development of *Erysiphe necator chasmothecia* on grapevine leaves. *Plant Pathology*, 61, 96–105.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2011.02498.x>
- Logan, J.A., Wollkind, D.J., Hoyt, S. C., Tanigoshi, L. K. (1976). An Analytic Model for Description of Temperature Dependent Rate Phenomena in Arthropods, *Environmental Entomology*, Volume 5, Issue 6, 1 December 1976, Pages 1133–1140, <https://doi.org/10.1093/ee/5.6.1133>
- McKay, S., & Taylor, A. (2018). Downy and powdery mildew: Highlights from the 8th international workshop on grapevine downy and powdery mildew. *Wine & Viticulture Journal*, 33(2), 54–57.
- Milonas PG, Savopoulou-Soultani M, Stavridis DG. 2001. Day-degree models for predicting the generation time and flight activity of local populations of *Lobesia botrana* (Den. & Schiff.) (Lep., Tortricidae) in Greece. *J. Appl. Ent.* 125: 515-518
- Molitor D. (2009): Untersuchungen zur Biologie und Bekämpfung der Schwarzfäule (*Guignardia bidwellii*) an Weinreben. Dissertation, Justus-Liebig-Universität Gießen
- Morroni, M., Zanzotto, A., Caffi, T., & Trevisol, F. (2012). Gestione dei trattamenti antiperonosporici mediante l'ausilio di un modello previsionale sulle infezioni primarie: due annate di sperimentazione nel trevigiano. In *ATTI Giornate Fitopatologiche 2012* (pp. 393–399).
- Rossi, V., & Caffi, T. (2012). The role of rain in dispersal of the primary inoculum of *Plasmopara viticola*. *Phytopathology*, 102(2), 158–165. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-08-11-0223>
- Rossi, V., Caffi, T., Giosuè, S., & Bugiani, R. (2008). A mechanistic model simulating primary infections of downy mildew in grapevine. *Ecological Modelling*, 212(3–4), 480–491.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.10.046>
- Rossi, V., Caffi, T., Legler, S. E., Carotenuto, E., & Bigot, G. (2014). Large-scale application of a web-based Decision Support System for sustainable viticulture. *IOBC/WPRS Bulletin*, 105, 129–136.
- Rossi, V., Onesti, G., Legler, S. E., & Caffi, T. (2015). Use of systems analysis to develop plant disease models based on literature data: grape black-rot as a case-study. *European Journal of Plant Pathology*, 141(3), 427–444. <https://doi.org/10.1007/s10658-014-0553-z>
- Rossi, V., Sperandio, G., Caffi, T., Simonetto, A., & Gilioli, G. (2019). Critical Success Factors for the Adoption of Decision Tools in IPM. *Agronomy*, 9 (710), 1–19.
- Schultz, H.R., 1992: An empirical model for the simulation of leaf appearance and leaf development of primary shoots of several grapevine (*Vitis vinifera* L.) canopy- systems. *Scientia Hort.*; 52: 179-200
- Strizyk S (1981) Model de l'Etat Potentiel Infectieux. Application a Botrytis cinerea. ACTA, Paris (FR).
- Strizyk S (1983) Model de l'Etat Potentiel Infectieux. Application a Plasmopara viticola. ACTA, Paris (FR).
- Vogt, E., Schruft, G. (2000). *Weinbau* - Eugen Ulmer, p. 322-328

Iniziativa realizzata nell'ambito del Programma regionale per un settore vitivinicolo sostenibile (Dgr n. 1820/2018).

D.g.r. n. 1510 del 10/11/2020. Accordo di collaborazione tra la Regione del Veneto e il Centro di Ricerca Viticoltura ed Enologia del Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria (CREA-VE), per diffondere la conoscenza di prodotti e pratiche agronomiche in grado di ridurre l'impiego complessivo di fitofarmaci utilizzati anche avvalendosi di mezzi di biocontrollo o altre sostanze a basso rischio (obiettivo di riduzione dell'indicatore di rischio armonizzato HRI 1, Direttiva (UE) 2019/782).