

Approcci Moderni per la Diagnosi e il Controllo delle Malattie delle Colture Orticole in Condizioni di Cambiamento Climatico

Автор(и): гл. ас. д-р Катя Василева, ИЗК "Марица" - Пловдив

Дата: 25.03.2026 Брой: 3/2026



Sommario

Il cambiamento climatico sta alterando significativamente la dinamica delle malattie delle colture orticole, portando a uno sviluppo più rapido dei patogeni, una maggiore sopravvivenza dell'inoculo e focolai epidemici più frequenti. L'aumento delle temperature, le precipitazioni estreme e i periodi di siccità creano condizioni che facilitano le infezioni da virus, batteri e patogeni fungini. In

queste condizioni, i metodi diagnostici tradizionali sono spesso insufficienti a causa della sovrapposizione dei sintomi e dei cambiamenti indotti dallo stress. Gli approcci moderni includono test immunocromatografici rapidi, metodi molecolari, diagnostica iperspettrale, tecnologie con droni e modelli predittivi. Una gestione efficace delle malattie richiede un approccio integrato che coinvolga varietà resistenti, biofungicidi, biostimolanti e pratiche agronomiche ottimizzate. La combinazione di strumenti diagnostici tradizionali e moderni, supportata da una valutazione fitopatologica esperta, è la chiave per una produzione sostenibile in condizioni di cambiamento climatico.

Le malattie delle piante continuano a essere una delle sfide più serie per l'agricoltura moderna, causando perdite annuali significative in termini di resa, qualità e resilienza dell'agroecosistema. Secondo Fang e Ramasamy (2015), le perdite causate dai patogeni "variano tra il 20% e il 40%" e rappresentano un fattore chiave che minaccia la sicurezza alimentare globale. In condizioni di cambiamento climatico, sistemi di produzione intensivi e flussi commerciali globalizzati, il rischio di epidemie, l'emergere di nuove razze e la diffusione di patogeni invasivi aumentano significativamente (Juroszek & von Tiedemann, 2011).

Una gestione efficace delle malattie richiede due direzioni interconnesse: una diagnosi precisa e tempestiva e strategie di controllo sostenibili che integrino approcci biologici, agronomici, chimici e digitali. Negli ultimi decenni, la diagnosi ha subito una profonda trasformazione – dalla valutazione visiva e dalla microscopia ai metodi molecolari, alle piattaforme di fenotipizzazione ad alto rendimento, ai sensori remoti e agli algoritmi di deep learning. Come notato da Balodi et al. (2017), "la scienza della diagnosi delle malattie si è evoluta dall'ispezione visiva a tecniche sierologiche e molecolari altamente sensibili", aumentando significativamente l'accuratezza e la velocità di rilevamento.

Parallelamente, il concetto di controllo delle malattie si sta spostando da soluzioni chimiche unilaterali a una gestione integrata, ecologicamente ed evolutivamente solida. He et al. (2016) sottolineano che una gestione sostenibile deve "creare condizioni favorevoli per la crescita delle piante e sfavorevoli per la riproduzione e l'evoluzione del patogeno", combinando Resistenza, Evitamento, Eliminazione, Rimedio (RAER). Le nuove tendenze includono il biocontrollo, gli estratti vegetali, gli approcci genetici, i modelli predittivi e i sistemi digitali di supporto alle decisioni (Mukhtar et al., 2023).

In questo contesto, vengono riassunti i progressi scientifici contemporanei in due direzioni chiave:

- (1) diagnosi delle malattie delle piante, inclusi metodi classici, ottici e basati sull'IA;
- (2) controllo e gestione integrata, considerando approcci ecologici, biologici, genetici e tecnologici.

Questo duplice focus permette di tracciare come i progressi nella diagnosi supportino una gestione delle malattie più precisa, sostenibile e adattiva nel contesto di agroecosistemi in dinamico cambiamento.

Una diagnosi efficace è il fondamento di qualsiasi strategia di gestione delle malattie. Determina la decisione corretta, minimizza le perdite e consente un intervento precoce per il controllo. Come sottolineato da Balodi et al., (2017), "la scienza della diagnosi delle malattie si è evoluta dall'ispezione visiva... a tecniche sierologiche e molecolari altamente sensibili". Gli approcci moderni possono essere raggruppati in tre direzioni principali: metodi di laboratorio classici, tecnologie ottiche e remote e intelligenza artificiale.

Le tecniche sierologiche come ELISA, immunofluorescenza e test immunocromatografici rapidi rimangono ampiamente utilizzate per la loro specificità e applicabilità in condizioni di campo. L'ELISA è uno dei metodi più diffusi, dove "il cambiamento di colore visivo permette un facile rilevamento" (Fang & Ramasamy, 2015). Tuttavia, la sensibilità per i patogeni batterici è limitata.

I metodi molecolari, in particolare la PCR e le sue varianti (nested, multiplex, real time), offrono la massima accuratezza. Balodi et al., (2017) notano che le analisi basate su PCR sono "specifiche, sensibili, efficienti, rapide e relativamente economiche". La PCR in tempo reale consente una valutazione quantitativa ed è particolarmente preziosa per i test sui semi e i patogeni da quarantena.

Le piattaforme di fenotipizzazione (fluorescenza della clorofilla, imaging iperspettrale e termico) forniscono un'osservazione non distruttiva e ripetuta. Secondo Balodi et al., (2017) "questi metodi sono non distruttivi... e permettono la visualizzazione di reazioni localizzate". La diagnostica iperspettrale è particolarmente promettente per il rilevamento precoce, in quanto cattura i cambiamenti fisiologici prima che compaiano i sintomi visibili.

Fang e Ramasamy (2015) sottolineano che le tecniche iperspettrali "sono ampiamente utilizzate per identificare le malattie attraverso cambiamenti nella riflettanza". La termografia e la

fluorescenza completano l'analisi ma sono sensibili alle condizioni esterne e spesso richiedono una combinazione con altri metodi.

Negli ultimi anni, il deep learning è diventato uno strumento chiave per il riconoscimento automatico delle malattie. Li et al., (2021) notano che "il deep learning evita i difetti della selezione manuale delle caratteristiche... e rende l'estrazione delle caratteristiche più oggettiva". Le architetture CNN come AlexNet, GoogLeNet, ResNet e DenseNet raggiungono accuratèzze superiori al 95-99% su dataset controllati. Saleem et al., (2019) mostrano che GoogLeNet supera AlexNet su PlantVillage, e Demilie (2024) conclude che le CNN "sono spesso la scelta preferita... a causa della loro capacità di catturare gerarchie spaziali". Tuttavia, le reali condizioni di campo rimangono una sfida e richiedono modelli più complessi combinati con sensori remoti e sistemi predittivi.

Le strategie di controllo moderne si stanno evolvendo da approcci dominati dalla chimica a sistemi integrati, ecologicamente orientati ed evolutivamente sostenibili. L'obiettivo principale è ridurre la pressione dei patogeni mantenendo la produttività e l'equilibrio ecologico.

Il cambiamento climatico sta alterando l'epidemiologia delle malattie e richiede strategie adattive. Juroszek e von Tiedemann (2011) notano che "le misure preventive... potrebbero diventare particolarmente importanti in futuro". Mukhtar et al., (2023) sottolineano che l'IPDM è "il metodo più adatto e rilevante nelle attuali circostanze". Le nuove tendenze includono: estratti vegetali – ad es. *Lantana camara*, i cui estratti "sopprimono la crescita di *Pyricularia oryzae* e *Xanthomonas* spp."; approcci genetici – espressione di regolatori come AtMYB12, che "aumenta i livelli di flavonoidi e la resistenza a diversi patogeni"; resistenza derivata dal patogeno (PDR) – strategie transgeniche contro i virus.

La diagnosi e i sistemi basati sull'IA supportano la gestione attraverso: il rilevamento e la localizzazione precoce dei focolai; la riduzione di trattamenti non necessari; l'integrazione con modelli predittivi; il monitoraggio dell'efficacia e della resistenza.

Come notato da Demilie (2024), il Machine Learning e il Deep Learning "migliorano le prestazioni e la velocità di rilevamento e classificazione", rendendoli una componente chiave dei moderni sistemi di IPM.

La sinergia tra diagnosi moderna e gestione integrata crea nuove opportunità per un'agricoltura precisa, efficace ed ecologicamente sostenibile. Questa combinazione permette non solo di ridurre le perdite, ma anche di costruire agroecosistemi più resilienti in grado di rispondere alle sfide future.

Materiali e Metodi

I principali patogeni che colpiscono le colture orticole sono virus (TSWV, ToMV, PMMoV, PVY), batteri (*Xanthomonas*, *Pseudomonas*, *Clavibacter*) e patogeni fungini come *Phytophthora*, *Fusarium*, *Verticillium*, *Alternaria* e *Botrytis* (Figura 1).



Figura 1. Sintomi di peronospora della patata, verticilliosi del peperone, maculature batteriche del peperone, cancro batterico del pomodoro

Il cambiamento climatico porta a "temperature aumentate → sviluppo più rapido del patogeno" e "stagioni di crescita più lunghe → più cicli di infezione". Per scopi diagnostici, sono stati utilizzati sia metodi tradizionali che moderni. La valutazione iniziale è stata la diagnosi visiva, che è rapida ma soggettiva, poiché "i sintomi possono sovrapporsi tra diversi patogeni o fattori abiotici". È stata applicata la microscopia per osservare le strutture morfologiche, con colorazioni specifiche

utilizzate in alcuni casi. I terreni di coltura sono stati utilizzati per isolare batteri e funghi, mentre i virus sono stati diagnosticati utilizzando test immunocromatografici.

I test immunocromatografici rapidi utilizzati sono stati: AgriStrip® (BIOREBA), Pocket Diagnostic® e LOEWE®FAST, che consentono il rilevamento di virus, batteri e alcuni patogeni fungini entro 5-10 minuti e sono "adatti per campo e laboratorio" (Figura 2).



Figura 2. Test immunocromatografici rapidi: AgriStrip® (BIOREBA), Pocket Diagnostic® e LOEWE®FAST

Per la conferma dei risultati, sono raccomandati metodi molecolari (PCR, qPCR, LAMP), distinti da "sensibilità molto elevata" e "elevata specificità", ma che richiedono un laboratorio specializzato. Sono ampiamente utilizzati metodi iperspettrali per il rilevamento precoce delle infezioni e la valutazione dello stress fisiologico, con la tecnologia definita "non invasiva, rapida e scalabile". Sono stati utilizzati droni con sensori RGB, multispettrali, iperspettrali e termici per il monitoraggio in campo, la mappatura delle malattie e la valutazione della biomassa. Sono stati utilizzati modelli predittivi basati su temperatura, umidità, precipitazioni e microclima per prevedere il rischio di infezione e ottimizzare i tempi di trattamento. Nella produzione orticola sono ampiamente utilizzati biofungicidi (ad es. *Bacillus subtilis*, *Trichoderma harzianum*, *Pythium oligandrum*),

biostimolanti (aminoacidi, alghe, acidi umici) e fungicidi chimici (prodotti a base di rame, Mancozeb, Azoxystrobin, Difenconazole, ecc.).

Risultati

L'influenza del cambiamento climatico sulla dinamica dei patogeni e sulla frequenza delle malattie nelle colture orticole è chiaramente espressa. L'aumento delle temperature accelera lo sviluppo di molteplici patogeni e inverni più miti aumentano la sopravvivenza dell'inoculo. Le precipitazioni estreme creano condizioni favorevoli per lo sviluppo di malattie fungine e batteriche, poiché "un'umidità elevata > 90% accelera la sporulazione" e le gocce di pioggia facilitano la diffusione a lunga distanza dei batteri. La siccità porta a stress fisiologico e micro-crepe nelle foglie e nelle radici, che facilitano la penetrazione del patogeno - "lo stress da secco causa micro-crepe... punti di ing