ANÁLISES ESPACIAIS PARA DETERMINAR PADRÕES DE DOENÇAS DE PLANTAS: MÉTODOS E APLICAÇÕES

Felipe Pereira Aguiar Cunha de Almeida, Davi Reali Colombo, Gabriela Dias Zerboni, Lucas Jordão Santana Tigre, Renan Curty da Silva, Simone de Paiva Caetano Bucker Moraes, Willian Bucker Moraes.

Universidade Federal do Espírito Santo/Centro de Ciências Agrárias e Engenharias, Alto Universitário, s/n, Guararema, 29500-000 – Alegre – ES, Brasil, fpalmeida1103@gmail.com, davicolombo@icloud.com, gabrielazerboni2006@gmail.com, lucasjst01@gmail.com, curty.renan@gmail.com, simonepaivabucker@gmail.com, willian.moraes@ufes.br.

Resumo

A distribuição espacial das doenças de plantas constitui uma importante característica epidemiológica, pois permite compreender como as unidades doentes se organizam no campo e auxilia na interpretação de processos relacionados à dispersão. Objetivou-se revisar os principais métodos empregados na determinação de padrões espaciais de doenças de plantas. Foi realizada uma revisão narrativa da literatura, com levantamento bibliográfico no Portal de Periódicos CAPES, SciELO e Google Scholar. Os métodos foram agrupados em análises de adjacência, heterogeneidade entre unidades amostrais, autocorrelação espacial e métodos baseados em distância. Observou-se que diferentes análises podem identificar padrões distintos em uma mesma epidemia, pois avaliam componentes e escalas espaciais específicos. Conclui-se que cada método detecta propriedades específicas em determinada escala, e que a combinação de métodos, avaliações sucessivas e conhecimento biológico do patossistema fornece informações mais robustas para compreender a dispersão da doença e subsidiar estratégias de monitoramento e manejo.

Palavras-chave: Epidemiologia. Agregação. Heterogeneidade. Fitopatologia quantitativa.

Área do Conhecimento: Ciências Agrárias – Agronomia

Introdução

A agricultura possui função essencial na produção de alimentos e no desenvolvimento econômico e social. O ramo agrícola foi responsável por aproximadamente R$ 2,06 trilhões do PIB do agronegócio brasileiro, sendo que este alcançou R$ 3,20 trilhões em 2025, representando 25,13% da economia brasileira (CEPEA, 2026). Entretanto, Ferrão et al. (2017) afirmam que as culturas sofrem com limitações em suas produções; essas limitações podem ser advindas de fatores bióticos (seres vivos que geram impactos negativos) ou abióticos (gerados por questões ambientais, desequilíbrios nutricionais, déficit hídrico, etc.). Os patógenos causadores de doenças de plantas se enquadram nos fatores bióticos, e estes são responsáveis por acarretar danos aos cultivos e perdas às produções, comprometendo assim o desenvolvimento e produtividade das culturas. Diante disso, se torna imprescindível entender como as doenças progridem e se comportam no campo (Moraes et al., 2019).

A quantificação da doença no espaço permite descrever como plantas ou órgãos doentes se organizam na cultura (população hospedeira) e pode fornecer indícios sobre a disseminação do patógeno, fontes de inóculo e risco de infecção. O padrão espacial descreve a organização das unidades doentes em relação às demais unidades, sendo uma das características epidemiológicas da doença. Assim, mapas representativos de incidência da doença ganham significado quando são submetidos a procedimentos capazes de testar se a distribuição observada difere daquela esperada ao acaso (Madden; Hughes, 1995; Bergamin Filho *et al.*, 2007; Del Ponte, 2023).

Os padrões são usualmente classificados como aleatório, agregado ou regular. No padrão aleatório, as unidades apresentam distribuição ao acaso na área, não sendo possível observar uma associação espacial entre as plantas doentes. No padrão agregado, unidades doentes ocorrem próximas umas das outras com frequência superior à esperada sob distribuição aleatória, formando focos ou zonas de ocorrência.

Já o padrão regular representa espaçamento mais uniforme do que o esperado, esta distribuição é encontrada de maneira menos frequente (Bergamin Filho *et al.*, 2007; Madden; Hughes; van den Bosch, 2007).

A literatura apresenta métodos baseados em sequências de plantas, pares adjacentes, unidades amostrais, autocorrelação, distância e estrutura de focos. Essas abordagens não são substitutas, pois diferem, principalmente, quanto aos tipos de dados disponíveis: algumas exigem valor binário de plantas em linhas, outras utilizam incidência ou contagem em quadrats (unidades amostrais de tamanho e formato previamente definidos), enquanto análises como Moran e SADIE (*Spatial Analysis by Distance IndicEs*) dependem da posição relativa ou das coordenadas dos pontos. A visualização de mapas pode sugerir focos, mas não é possível afirmar sobre o padrão espacial expresso pela doença. Por isso, a escolha de um teste deve partir da pergunta epidemiológica e da natureza dos dados (Xu; Madden, 2004; Madden *et al.*, 2018; Del Ponte, 2023). Compreender as diferenças entre os métodos é fundamental para interpretar corretamente os padrões espaciais e gerar informações úteis ao monitoramento e ao manejo.

Diante disso, este trabalho objetivou revisar os principais métodos empregados na determinação de padrões espaciais de doenças de plantas, destacando os tipos de dados requeridos, a escala de detecção, os critérios de interpretação, as limitações e as aplicações epidemiológicas.

Metodologia

Foi realizada uma revisão narrativa da literatura sobre os principais métodos empregados na análise de padrões espaciais de doenças de plantas. Para o levantamento bibliográfico, foram consultados o Portal de Periódicos CAPES, SciELO, Google Scholar e a plataforma *R for Plant Disease Epidemiology* (R4PDE), utilizando combinações dos termos “doenças de plantas”, “padrão espacial”, “epidemiologia espacial”, “plant disease”, “spatial pattern”, “runs”, “doublets”, “binary power law”, “beta-binomial”, “Moran’s I”, “LISA” e “SADIE”.

Resultados

Os métodos identificados foram agrupados em quatro classes: análises de adjacência e estrutura de focos; medidas de heterogeneidade entre unidades amostrais; autocorrelação global e local; índices baseados em distância. Essa classificação evidencia que diferentes métodos respondem a questões distintas e operam em escalas local, intermediária ou global (Tabela 1).

Tabela 1 - Síntese dos principais métodos espaciais empregados em epidemiologia de doenças de plantas.

Método	Dados e escala	Interpretação principal	Limitação central
Runs e doublets	Valores 0/1 em sequência ou pares adjacentes; escala local.	Poucos runs ou excesso de pares doente-doente indicam agregação em relação ao acaso.	Não estimam diretamente a distância ou o alcance da dependência.
Análise de focos	Mapa 2D de plantas sadias e doentes.	Descreve número, tamanho, forma, compactação, orientação, expansão e fusão de focos.	A interpretação é influenciada pela incidência e pela regra de adjacência.
Índice de dispersão e beta-binomial	Número de unidades doentes em quadrats.	Variância superior à binomial e superdispersão positiva sustentam heterogeneidade/agregação.	O resultado depende do tamanho e da orientação do quadrat.
Lei de potência binária	Variâncias observada e binomial de vários conjuntos de incidência.	Parâmetros da regressão quantificam heterogeneidade média e sua relação com a incidência.	Requer vários conjuntos comparáveis e não localiza os agrupamentos.
Moran global e LISA	Valores por planta ou quadrat e matriz de vizinhança.	Moran avalia autocorrelação geral; LISA identifica agrupamentos e discrepâncias locais.	Sensível à definição dos vizinhos e à multiplicidade de testes locais.
SADIE	Contagens em unidades com posição conhecida.	Compara a distância observada à regularidade e delimita manchas e lacunas.	É condicionado à configuração amostral e ao padrão espacial inicial.

Fonte: elaborado pelos autores com base em Moran (1950), Anselin (1995), Madden e Hughes (1995), Perry (1995), Xu e Madden (2004), Bergamin Filho *et al.* (2007), Madden *et al.* (2018) e Del Ponte (2023).

Runs e doublets utilizam a ordem das plantas para verificar se a proximidade entre unidades doentes supera a expectativa de uma sequência aleatória. A análise de focos caracteriza os agrupamentos de plantas doentes quanto ao número, tamanho, forma, compactação e orientação, permitindo ainda acompanhar sua expansão e fusão ao longo da epidemia. Em contraste, o índice de dispersão, a

distribuição beta-binomial e a lei de potência binária avaliam a heterogeneidade entre quadrats, podendo ser empregados mesmo quando a posição relativa das unidades não participa diretamente do cálculo (Madden; Hughes, 1995; Bergamin Filho *et al.*, 2007; Madden *et al.*, 2018).

O Moran Global avalia se unidades espacialmente próximas apresentam valores mais semelhantes ou distintos do que seria esperado ao acaso, fornecendo uma medida geral de autocorrelação para a área, enquanto os indicadores locais de associação espacial (LISA) identificam agrupamentos alto-alto, baixo-baixo e observações discrepantes. A SADIE mede a distância necessária para transformar o arranjo observado em uma distribuição regular e produz índices locais de manchas e lacunas (Moran, 1950; Anselin, 1995; Perry, 1995; Xu; Madden, 2004).

Discussão

Não há como definir um método universal ideal para determinação do padrão espacial, pois cada análise avalia uma característica específica de doenças de plantas. Os testes de runs e doublets são simples e sensíveis à adjacência em linhas, utilizando-se de dados binários. A análise de focos descreve características geométricas. As distribuições binomial e beta-binomial e a lei de potência binária avaliam heterogeneidade entre unidades. Moran e LISA incorporam a relação de vizinhança, permitindo avaliar, respectivamente, a autocorrelação global e a localização de associações espaciais específicas. Segundo Xu e Madden (2004) a SADIE avalia a agregação espacial com base na distância à regularidade, permitindo ainda identificar manchas e lacunas na área. Consequentemente, resultados divergentes podem representar componentes espaciais distintos e não devem ser interpretados automaticamente como erro metodológico (Madden; Hughes, 1995; Del Ponte, 2023).

A clorose variegada dos citros exemplifica essa complementaridade. Laranjeira *et al.* (2004) encontraram tendência à aleatoriedade em grande parte das análises de sequências ordinárias, sugerindo menor disseminação imediata entre plantas, enquanto o índice de dispersão, lei de potência binária e a estrutura de focos caracterizaram o padrão como levemente agregado. O contraste indica que a agregação pode ser pouco evidente na adjacência planta a planta, mas detectável quando a área é dividida em quadrats (Laranjeira *et al.*, 2004).

Aplicações de runs e doublets também mostraram predomínio de padrões aleatórios para a mancha-púrpura do alho, a cercosporiose da beterraba e o míldio da cebola (Marcuzzo; Harbs; Nascimento, 2020; Marcuzzo et al., 2020; Marcuzzo; Mariano; Paulakoski, 2022). Na murcha de *Fusarium* do cafeeiro conilon, o teste de runs classificou as duas áreas como aleatórias durante o período avaliado, embora tenha sido observada tendência de evolução para agregação (Belan *et al.*, 2019). Esses resultados não significam ausência de processo epidemiológico, mas apenas que no período avaliado não foi identificada agregação significativa. Além disso, padrões aleatórios podem estar associados à baixa incidência, entrada de inóculo externo, material propagativo contaminado, escala incompatível com a dispersão ou ao curto período de acompanhamento da doença, visto que o padrão da doença pode mudar ao longo da epidemia (Madden; Hughes, 1995).

A lei de potência binária é importante para caracterizar a heterogeneidade da incidência entre unidades amostrais, especialmente porque a variância binomial muda com a incidência. Essa heterogeneidade é denominada superdispersão quando a variância observada entre os quadrats é superior à variância esperada sob uma distribuição binomial. Como a variância binomial se modifica de acordo com a incidência média, a relação entre as duas variâncias permite comparar conjuntos de dados com diferentes níveis de doença (Madden *et al.*, 2018). Madden *et al.* (2021), ao sintetizarem resultados de diferentes patossistemas, demonstraram que a heterogeneidade espacial é recorrente, embora sua intensidade varie conforme as características das epidemias, das unidades amostrais e dos estudos. Entretanto, a lei de potência binária resume o grau médio de heterogeneidade de uma coleção de dados e não identifica a localização dos focos, sendo assim, sua associação com mapas, análises de autocorrelação ou métodos locais pode ampliar a interpretação epidemiológica (Madden; Hughes, 1995; Del Ponte, 2023).

O desempenho das análises é condicionado pelo tamanho e pela orientação das unidades amostrais, pela incidência, pela definição de vizinhança e pelo padrão inicial. Xu e Madden (2004) demonstraram que a SADIE foi fortemente influenciada pelo padrão inicial e pelo tamanho do quadrat. Assim, a definição do método e do esquema amostral deve ocorrer antes da coleta de dados e estar relacionada à escala do processo epidemiológico que se pretende investigar.

Do ponto de vista aplicado, a detecção de agregação pode sustentar hipóteses de dispersão a curta distância, influência de operações de manejo, vetores, solo ou microambiente (Moraes *et al.*, 2019). Já

padrões aleatórios podem ser compatíveis com fontes externas ou dispersão de maior alcance. Persistem lacunas relacionadas à baixa padronização da escala, ao uso isolado de um único teste, à pouca validação em avaliações sucessivas e à integração limitada entre incidência, severidade e variáveis ambientais, devendo-se interpretar os resultados das análises espaciais em conjunto com informações sobre o patógeno, o hospedeiro, o ambiente e o manejo (Del Ponte, 2023). Estudos futuros devem definir a pergunta e o esquema amostral antes da coleta, aplicar métodos complementares e acompanhar a evolução espacial ao longo da epidemia.

Conclusão

As análises espaciais transformam mapas de doenças em evidência estatística sobre a organização e a agregação entre unidades doentes. Cada método detecta propriedades específicas e opera em determinada escala, de modo que a interpretação deve considerar o patógeno, a posição das unidades, a incidência e a organização das amostras (unidades avaliadas), sendo assim estas variáveis são importantes para a escolha dos métodos a serem utilizados para a caracterização espacial. A combinação de métodos, avaliações sucessivas e conhecimento biológico do patossistema produz informações mais concretas para a compreensão da dispersão e, consequentemente, para a elaboração de estratégias para o monitoramento e manejo da doença.

Referências

ANSELIN, L. Local indicators of spatial association - LISA. **Geographical Analysis**, v. 27, n. 2, p. 93-115, 1995. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x.

BELAN, L. L. *et al.* Análise espaço-temporal da murcha de *Fusarium* em plantas de cafeeiro conilon clone CV-02 da variedade Vitória - Incaper 8142. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 10., 2019, Vitória. **Anais [...]**. Brasília, DF: Embrapa Café, 2019. p. 1-5.

BERGAMIN FILHO, A.; HAU, B.; AMORIM, L.; LARANJEIRA, F. F. Análise espacial e temporal de epidemias de patógenos de solo. In: POLTRONIERI, L. S.; TRINDADE, D. R.; SANTOS, I. P. (org.). **Fitossanidade na Amazônia: inovações tecnológicas**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2007. p. 17-36.

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA (CEPEA). PIB do Agronegócio Brasileiro. Piracicaba: **CEPEA/ESALQ-USP**, 27 abr. 2026. Disponível em: https://cepea.org.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx. Acesso em: 20 jul. 2026.

DEL PONTE, E. M. **R for Plant Disease Epidemiology (R4PDE)**. Viçosa, MG: Autor, 2023. Disponível em: https://r4pde.net/. Acesso em: 20 jul. 2026.

FERRÃO, R. G.; FONSECA, A. F. A.; FERRÃO, M. A. G.; DE MUNER, L. H. **Café conilon**. Vitória, ES: Incaper, 2017. 784 p.

LARANJEIRA, F. F.; BERGAMIN FILHO, A.; AMORIM, L.; GOTTWALD, T. R. Dinâmica espacial da clorose variegada dos citros em três regiões do Estado de São Paulo. **Fitopatologia Brasileira**, v. 29, n. 1, p. 56-65, 2004. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-41582004000100009.

MADDEN, L. V.; HUGHES, G. Plant disease incidence: distributions, heterogeneity, and temporal analysis. **Annual Review of Phytopathology**, v. 33, p. 529-564, 1995. DOI: https://doi.org/10.1146/annurev.py.33.090195.002525.

MADDEN, L. V.; HUGHES, G.; MORAES, W. B.; XU, X.-M.; TURECHEK, W. W. Twenty-five years of the binary power law for characterizing heterogeneity of disease incidence. **Phytopathology**, v. 108, n. 6, p. 656-680, 2018. DOI: https://doi.org/10.1094/PHYTO-07-17-0234-RVW.

MADDEN, L. V.; HUGHES, G.; VAN DEN BOSCH, F. **The study of plant disease epidemics**. St. Paul: APS Press, 2007. DOI: https://doi.org/10.1094/9780890545058.

MADDEN, L. V.; MORAES, W. B.; HUGHES, G.; XU, X.-M. A meta-analytical assessment of the aggregation parameter of the binary power law for characterizing spatial heterogeneity of plant disease incidence. **Phytopathology**, v. 111, n. 11, p. 1983-1993, 2021. DOI: https://doi.org/10.1094/PHYTO-02-21-0056-R.

MARCUZZO, L. L.; HARBS, S. C.; NASCIMENTO, A. Caracterização da epidemiologia temporal e espacial da cercosporiose da beterraba. **Summa Phytopathologica**, v. 46, n. 4, p. 348-350, 2020. DOI: https://doi.org/10.1590/0100-5405/189360.

MARCUZZO, L. L.; HARBS, S. C.; PAULAKOSKI, A. C.; LUIZ, L. Caracterização da epidemiologia temporal e espacial do míldio da cebola. **Revista Thema**, v. 17, n. 3, p. 731-741, 2020. DOI: https://doi.org/10.15536/thema.V17.2020.731-741.1636.

MARCUZZO, L. L.; MARIANO, D. D.; PAULAKOSKI, A. C. Análise da epidemiologia temporal e espacial da mancha púrpura do alho. **Revista Agronomia Brasileira**, v. 6, p. 1-6, 2022. DOI: https://doi.org/10.29372/rab202224.

MORAES, W. B.; XAVIER, A. S.; ALVES, F. R.; BELAN, L. L.; ROCHA, M. R.; FERREIRA, M. L. S. M. Murcha de *Fusarium* em cafeeiro conilon: entender para manejar! In: PARTELLI, F. L.; ESPINDULA, M. C. (org.). **Café conilon**: conhecimento para superar desafios. Alegre, ES: CAUFES, 2019. p. 31-60.

MORAN, P. A. P. Notes on continuous stochastic phenomena. **Biometrika**, v. 37, n. 1/2, p. 17-23, 1950. DOI: https://doi.org/10.1093/biomet/37.1-2.17.

PERRY, J. N. Spatial analysis by distance indices. **Journal of Animal Ecology**, v. 64, n. 3, p. 303-314, 1995. DOI: https://doi.org/10.2307/5892.

XU, X.-M.; MADDEN, L. V. Use of SADIE statistics to study spatial dynamics of plant disease epidemics. **Plant Pathology**, v. 53, n. 1, p. 38-49, 2004. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2004.00949.x.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Epidemiologia e Manejo de Doenças de Plantas Agrícolas e Florestais (LEMP) e ao Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Manejo Fitossanitário de Pragas e Doenças (NUDEMAFI), da Universidade Federal do Espírito Santo - Campus de Alegre, pelo apoio institucional, e à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.