

# Modelagem da Dinâmica Espaço-Temporal do Fungo *Phakopsora pachyrhizi* no Mato Grosso

Nayara L. S. Zagui<sup>1</sup>

IFMT, Juína, MT

André Krindges<sup>2</sup>

ICET/UFMT, Cuiabá, MT

Carlos R. Minussi<sup>3</sup>

DEE/Unesp, Ilha Solteira, SP

Moiseis dos S. Cecconello<sup>4</sup>

ICET/UFMT, Cuiabá, MT

**Resumo.** A ferrugem asiática da soja é pesquisada desde os seus primeiros registros. O fungo causador da doença é levado pelo vento, o que inviabiliza o seu controle. Esta pesquisa buscou modelar a sua dispersão a partir de uma equação diferencial parcial muito utilizada por pesquisadores que procuram modelar o comportamento de um poluente qualquer. Os termos dessa equação foram desenvolvidos a partir de dados reais, e os resultados das simulações foram comparados com registros da doença ao longo de uma safra.

**Palavras-chave.** Concentração de patógeno, Ferrugem Asiática da Soja, Equação Difusão-Advecção, *Phakopsora pachyrhizi*

## 1 Introdução

A ferrugem asiática da soja é uma doença de plantas que está presente no agronegócio brasileiro há 20 anos. Causa o amadurecimento precoce dos grãos, ocasionando redução significativa na produtividade da lavoura. É causada pelo fungo *Phakopsora pachyrhizi*, que tem na soja seu principal hospedeiro. Seus esporos são levados pelo vento, e a existência de sojas voluntárias às margens das rodovias no período entre-safra garante a continuidade da doença de uma safra para outra.

Para estimar a concentração desse fungo, construiu-se uma Equação Difusão-Advecção. Trata-se de uma Equação Diferencial bastante disseminada entre pesquisadores que modelam o comportamento de poluentes. A equação envolve um termo difusivo, que se refere à própria aptidão de dispersão do poluente, um termo de transporte, representado pelo campo vetorial que transfere o poluente de um lugar para outro no sistema, o decaimento, que pode ser interpretado como uma taxa de mortalidade e o termo fonte, que garante a produção desse poluente.

O domínio escolhido para a construção das aproximações numéricas foi o estado de Mato Grosso, por ser o maior produtor de soja do país. O modelo foi alimentado com dados do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, e os resultados foram comparados com os registros de ocorrências da doença disponibilizados pelo Consórcio Antiferrugem.

---

<sup>1</sup>nayara.sartor@ifmt.edu.br

<sup>2</sup>krindges@ufmt.br

<sup>3</sup>minussi@dee.feis.unesp.br

<sup>4</sup>moiseis@gmail.com

A princípio o texto apresentará de forma concisa a modelagem clássica do problema, e como foram desenvolvidas as discretizações espaciais, temporais e do domínio. Também será explicado como foram construídos os termos difusivo, fonte, transporte e decaimento, que constituem a equação. Em seguida, será esclarecida como se deu a definição dos parâmetros utilizados, e serão expostos os resultados das simulações numéricas. Por fim, serão registradas as impressões que ficaram a respeito das soluções obtidas.

## 2 Equação Difusão-Advecção

A Equação Difusão-Advecção (EDA) é um tipo de Equação Diferencial (ED) amplamente usada para modelar os mais variados fenômenos. O objetivo, em geral, é obter uma função que descreva a concentração (ou a dispersão). Pode ser concentração de animais infectados por um vírus, de poluentes num rio, dispersão de um determinado veneno no ar, entre outros.

Autores como [4, 5, 8, 10] utilizaram a referida equação para simular variados fenômenos. [8] modelou o comportamento da febre aftosa em bovinos, enquanto [5, 10] simularam a evolução de poluentes no lago de Manso, em Mato Grosso, em duas e três dimensões. Já [4] modelou a dispersão de poluentes em sistema ar-água.

Os esporos causadores de doenças transmitidas pelo ar, podem ser tratados como partículas poluentes, e sua dispersão também pode ser modelada a partir de uma abordagem Euleriana de Difusão-Advecção [9]. Por isso optou-se pela utilização dessa equação para descrever espacial e temporalmente a dispersão do fungo *Phakopsora pachyrhizi*.

Chamando de  $C(t, x, y)$  a concentração de poluente no meio em estudo no ponto  $(x, y)$  no instante  $t$ , para a equação de difusão-advecção para  $C$ , tem-se:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \{\text{difusão}\} - \{\text{transporte}\} - \{\text{decaimento}\} + \{\text{fonte}\}. \quad (1)$$

A solução numérica foi dada pela formulação variacional da equação dada, na sua forma clássica, por

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot (\alpha \nabla C) - \nabla \cdot (\vec{v} C) - \sigma C + f, \quad (x, y) \in \Omega \subset \mathbb{R}^2, \quad t \in (0, T] \subset \mathbb{R} \\ \nabla \cdot \vec{v} = 0 \\ \alpha \frac{\partial C}{\partial \eta} |_{\Gamma_1} = \theta(t, x, y) \\ \alpha \frac{\partial C}{\partial \eta} |_{\Gamma_2} = 0 \\ C(0, x, y) = C^0(x, y), \forall (x, y) \in \Omega \end{array} \right. \quad (2)$$

com as condições de contorno do tipo Von Neumann não homogênea representando o ingresso de poluente, e homogênea sem perda de poluente. A sua representação gráfica está registrada na Figura 2.

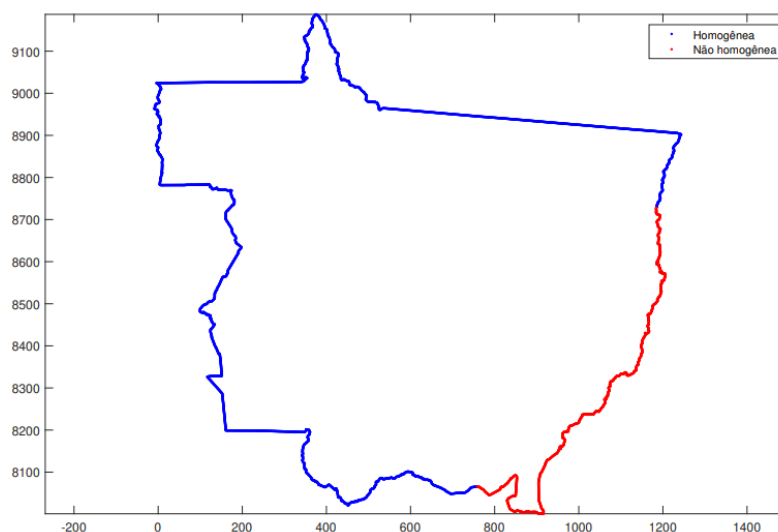


Figura 1: Condições de fronteira do tipo Von Neumann. Fonte: [12]

Para a discretização espacial foi utilizado o método de Galerkin e para a discretização temporal, o método de Crank-Nicolson. O domínio foi discretizado por Elementos Finitos triangulares. A construção da malha usada na pesquisa, foi desenvolvida com o software livre Gmsh, a partir de dados disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). O domínio escolhido para a EDA foi o território limitado pelo estado do Mato Grosso. São 5.417.224 triângulos e 2.712.315 nós, sendo 7.404 nós de fronteira e 2.704.911 nós internos.

A máquina utilizada para executar todos os testes e cenários é um servidor do laboratório de Matemática Aplicada (LAMAP) da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) contendo 144 GB de memória *ram* e dois processadores Intel *Xeon* quad-core, totalizando 6 núcleos de cada um. Para as simulações das concentrações de esporos, os algoritmos confeccionados foram aprimorados para poderem ser paralelizados. Foram 1.400 iterações, que levavam em média 170 segundos para gerar a matriz de rigidez e calcular a solução a cada passo do tempo.

## 2.1 Difusão

O coeficiente de *difusão* pode ser entendido como a própria capacidade de difusão do poluente. Para as simulações usou-se o equivalente ao parâmetro considerado no cenário três de [4], com o tempo dado em semanas. Nessa configuração, o autor simula a dispersão de um poluente atmosférico no ar. Já que o esporo do fungo *Phakopsora pachyrhizi* pode ser considerado como partícula poluente [9], o dado fora usado como base.

## 2.2 Transporte

O campo vetorial que leva o patógeno de um lugar para outro do sistema, é representado na equação pelo *transporte*. Sua construção foi feita com base nos dados de direção e velocidade do vento, disponíveis nas estações automáticas do Instituto Nacional Meteorológico - INMET. Assim, em todos os pontos da malha, durante todo o período estudado, obteve-se um vetor correspondente, possibilitando a variação temporal do termo transporte.

Além disso, para simular o efeito da circulação de veículos, foram acrescentados vetores paralelos às estradas em todos os pontos da malha que se distanciam até 1 km de rodovias. Para os mais

próximos, as intensidades dos vetores eram proporcionalmente aumentadas.

### 2.3 Decaimento

O *decaimento* representa a taxa de mortalidade do patógeno. Para estimar esse termo foi construído um sistema fuzzy, utilizando os dados de favorabilidade (condições favoráveis ao progresso da doença), o mapa de hospedeiros (locais onde há plantação de soja) e aplicação de defensivos agrícolas (fungicida) como variáveis de entrada. Para que haja infecção e esporulação é necessário que as condições ambientais sejam favoráveis. Além disso, as condições de sobrevivência dos esporos do fungo melhoram à medida que a distância até as propriedades diminui.

### 2.4 Fonte

O termo *fonte* pode ser interpretado como os locais onde o patógeno é "produzido". Ao longo de todas as principais rodovias do estado foram distribuídas fontes. Embora toda planta de soja seja eliminada ao final de cada safra, os grãos que caem nas estradas, durante o transporte do produto, germinam nas primeiras chuvas e podem ser infectados pelo fungo, assegurando a existência da ponte verde entre uma colheita e outra [11].

As margens das rodovias são de responsabilidade pública, e correspondem à 20 m à direita e 20 m à esquerda de faixa de recuo [6]. Por isso, optou-se por aumentar esse limite, de forma que todo nó da malha localizado a até 50 m de distância de alguma rodovia principal fosse considerado como fonte para a construção da equação.

## 3 Simulações

As simulações numéricas basearam-se em dados coletados do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET para o período compreendido entre final de 2018 e meados de 2019, que correspondem ao ano-safra 2018/2019. Em seguida, foram comparados aos registros de ocorrência da doenças no estado de Mato Grosso para o mesmo período, disponibilizados pelo Consórcio Antiferrugem.

Alguns parâmetros utilizados nas simulações da *concentração* variaram no tempo e no espaço. O coeficiente de *difusão* se baseou na pesquisa de [4], e os valores atribuídos aos parâmetros *fonte* e  $\theta$ , nas pesquisas de [2, 7]. Os dados estão resumidos na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros utilizados na EDA.

Parâmetro	Valor	Unidades
$\Delta t$	0,02	semanas
$\alpha$	100,8	km <sup>2</sup> /semana
$\theta$	$75 \times 10^5$	esporos/(km/semana)
$f$	$135 \times 10^6$	esporos/(km <sup>2</sup> /semana)

Fonte: [12]

Por lesão, são produzidos, no mínimo, em torno de 3 esporos nas folhas de soja (face superior e inferior) depois de 2 semanas de inoculação [7]. Cada cm<sup>2</sup> de lesão pode ter até 50 lesões [2]. Assim, cada cm<sup>2</sup> de lesão produz em torno de 75 esporos por semana.

Para o instante *zero* considerou-se o dia 31 de outubro, que é o dia da primeira ocorrência da doença registrada na safra de 2018/2019. As concentrações foram calculadas até dia 30 de abril, quando se encerra a colheita da soja para Mato Grosso [3]. Na Figura 2, é retratada a dispersão de esporos para o último dia de cada mês.

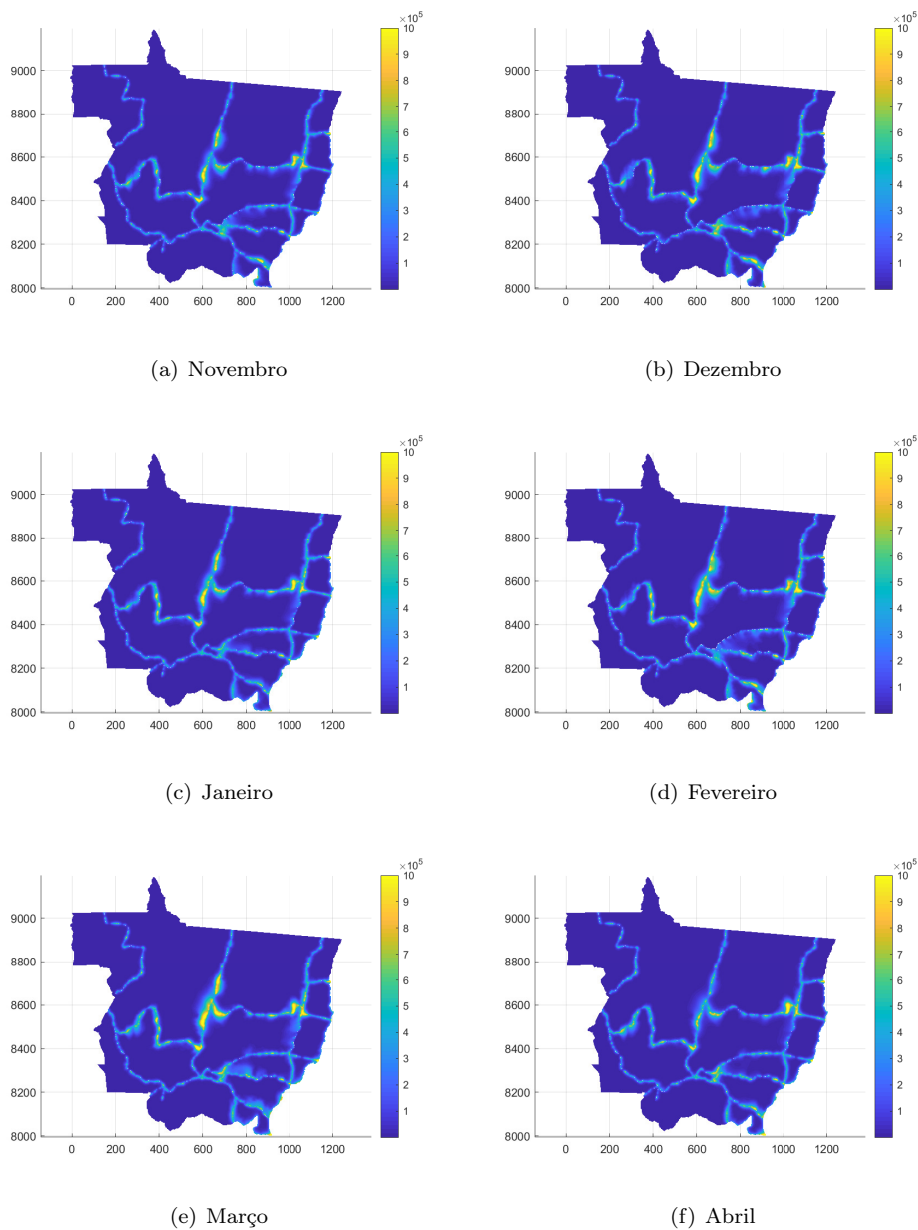


Figura 2: Concentrações de esporos ao longo da safra. Fonte: [13]

A Figura 3 apresenta as concentrações de esporos de alguns dos pontos onde ocorreu a doença na safra 2018/2019. A maior concentração registrada para essas localidades foi na cidade de Lucas do Rio Verde.

Cepa virulenta de um patógeno (fungo, bactéria ou vírus), hospedeiros distribuídos em uma região e condições ambientais favoráveis são fatores que, em conjunto, formam o *triângulo da enfermidade* de plantas [1]. Sendo assim, o desenvolvimento dessa pesquisa garante o estudo de uma das partes desse triângulo.

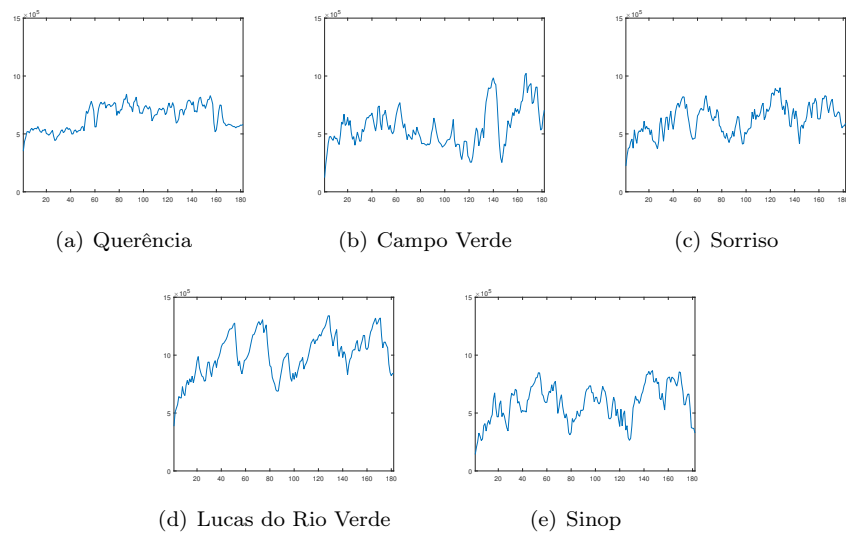


Figura 3: Concentrações de esporos para as localidades onde foram registradas ocorrências. Fonte: [12]

## 4 Considerações Finais

Para que a ferrugem asiática da soja se desenvolva, é necessária a interação entre três fatores, o chamado tripé da doença: hospedeiro, patógeno e condições climáticas favoráveis. Essa pesquisa se prestou a modelar a dinâmica espaço-temporal do fungo causador dessa doença.

Ao longo de todo o período estudado, foram obtidos dados para 182 dias. Esses dados foram utilizados como variáveis de entrada para um sistema fuzzy que modelou de forma mais apurada o desenvolvimento temporal e espacial da ferrugem asiática da soja para o estado de Mato Grosso.

A construção dos termos da equação levou em consideração várias nuances que influenciam o fenômeno. A lógica fuzzy estimando a atuação das variáveis meteorológicas na taxa de mortalidade, o campo vetorial reproduzindo a interferência do tráfego sobre a dispersão do patógeno e a implementação de fontes ao longo das rodovias, são exemplos de como buscou-se contemplar as diversas variáveis que atuam no sistema estudado.

Durante o desenvolvimento dessa pesquisa foi possível perceber que, embora exista muita pesquisa para entender a ferrugem asiática da soja, poucas se destinam a entender o macrocomportamento do fungo. Embora seja importante estudá-lo, existem limitações relativas à implementação da equação para um domínio de tamanha grandeza. Ainda que não seja simples, a reprodução dessa pesquisa nos demais estados produtores de soja, e até mesmo em países vizinhos também produtores do grão, permitiria uma percepção mais abrangente de como o fungo se comporta.

## Agradecimentos

Editais FAPEMAT 014/2022 - Ciências Exatas e da Terra.

## Referências

- [1] M. A. Altieri. **Agroecologia**. 4a. ed. Montevideo: Nordan-Comunidad, 1999.

- [2] S. A. M. Alves, G. Q. Furtado e A. Bergamin Filho. “Influência das condições climáticas sobre a ferrugem da soja”. Em: **Ferrugem asiática da soja**. Ed. por L. Zambolim. Vol. Único. UFV, DFP, 2006. Cap. 3, pp. 37–60.
- [3] **Calendário de plantio e colheita de grãos no Brasil 2019**. Brasília: CONAB, 2015.
- [4] G. L. Diniz. “Dispersão de poluentes num sistema ar-água”. Tese de doutorado. IMECC/Unicamp, 2003.
- [5] A. Krindges. “Modelagem e simulação computacional de um problema tridimensional de difusão-advecção com uso de Navier-Stokes”. Tese de doutorado. IMECC/Unicamp, 2011.
- [6] **Lei Nº 8.280, de 30 de dezembro de 2004. Dispõe sobre a definição e fixação de áreas de interesse público e de proteção às rodovias estaduais e dá outras providências**. MATO GROSSO. Cuiabá: Diário Oficial, 2004.
- [7] J. S. Melching, K. R. Bromfield e C. H. Kingsolver. “Infection, Colonization, and Uredospore Production on Wayne Soybean by Four Cultures of *Phakopsora pachyrhizi*, the Cause of Soybean Rust”. Em: **Phytopathology** 12 (1979), pp. 1262–1265.
- [8] M. Missio. “Modelos de EDP integrados à lógica **fuzzy** e métodos probabilísticos no tratamento de incertezas”. Tese de doutorado. IMECC/Unicamp, 2008.
- [9] Z. Pan, X Li, X. B. Yang, D. Andrade, L. Xue e N. Mckinney. “Prediction of plant diseases through modelling and monitoring airborne pathogen dispersal”. Em: **CAB Reviews Perspectives in Agriculture Veterinary Science Nutrition and Natural Resources** 18 (2010), pp. 2–11. DOI: 10.1079/PAVSNR20105018.
- [10] L. D. Wolmuth. “Modelagem e simulação do comportamento evolutivo de poluentes em corpos aquáticos de grande extensão”. Dissertação de mestrado. IMECC/Unicamp, 2009.
- [11] J. T. Yorinori. “Agressiva, ferrugem asiática exige manejo integrado”. Em: **Visão Agrícola** 5 (2006), pp. 96–99.
- [12] N. L. S. Zagui. “Modelagem e simulação do desenvolvimento temporal e espacial da ferrugem asiática da soja por meio de equações diferenciais e lógica fuzzy”. Tese de doutorado. FEIS/Unesp, 2021.
- [13] N. L. S. Zagui, A. Krindges, A. D. P. Lotufo e C. R. Minussi. “Spatio-temporal modeling and simulation of asian soybean rust based on fuzzy system”. Em: **Sensors** 22.2 (2022), p. 668. DOI: 10.3390/s22020668.