Modelos de tomada de decisão baseados em análises multivariadas para recomendação de herbicidas aplicados na pré-emergência da soja

Brunna de Carvalho Caetano [1], Beatriz Alves Welk[2], Matheus de Freitas Souza[3]

[1] Universidade de Rio Verde - UniRV, aluno de iniciação científica - PIVIC.
[2] Universidade de Rio Verde - UniRV, aluno de iniciação científica - PIVIC.
[3] Universidade de Rio Verde - UniRV, aluno de iniciação científica – PIVIC.

.

Reitor:
Prof. Me. Alberto Barella Netto

Pró-Reitor de Pesquisa e Inovação:
Prof. Dr. Carlos César E. de Menezes

Editor Geral:
Prof. Dra. Andrea Sayuri Silveira Dias Terada

Editores de Seção:
Profa. Dra. Ana Paula Fontana
Prof. Dr. Hidelberto Matos Silva
Prof. Dr. Fábio Henrique Baia
Pra. Dra. Muriel Amaral Jacob
Prof. Dr. Matheus de Freitas Souza
Prof. Dr. Warley Augusto Pereira

Fomento:
Programa PIBIC/PIVIC UniRV/CNPq 2022-2023

Resumo: A determinação precisa das doses de herbicidas pré-emergentes desempenha um papel fundamental na agricultura e é influenciada pela capacidade de retenção do solo. No entanto, as recomendações atuais frequentemente se baseiam apenas na textura do solo e na matéria orgânica, negligenciando outros atributos importantes. O objetivo deste estudo foi avaliar a viabilidade das análises multivariadas na classificação de solos com base em suas respostas às doses de herbicidas. Amostras de solo foram coletadas em várias regiões do centro-oeste brasileiro e submetidas a análises detalhadas de suas características físicas e químicas. Foi conduzido um experimento no qual foram aplicadas doses crescentes de diclosulam, utilizando o sorgo como planta bioindicadora. Análises estatísticas, incluindo correlação, análise de componentes principais, análise fatorial e agrupamento, foram empregadas para identificar os atributos do solo mais relevantes para as respostas às doses de herbicidas. Os atributos do solo que mais influenciaram as respostas às doses de herbicidas incluíram Ca+Mg, P, pH, Na, CTC, MO, silte, Ca/K e Mg/CTC. A análise de agrupamento pelo método *k-means* dividiu os solos em dois grupos distintos, com diferentes níveis de sensibilidade ao diclosulan e características do solo. O grupo com pH mais baixo necessitou de doses mais elevadas para causar 80% de intoxicação nas plantas de sorgo, indicando maior sorção do herbicida em solos com pH mais baixo e maior teor de argila. As análises multivariadas mostraram-se eficazes na categorização de solos com base em suas respostas às doses de diclosulam.

Palavras-Chave: Análise multivariada. Spider®. Dose.

Multivariate Analysis-Based Decision Models for pre-emergence herbicide recommendations in soybean

Abstract: *Accurate determination of pre-emergence herbicide doses plays a crucial role in agriculture and is influenced by soil retention capacity. However, current recommendations often rely solely on soil texture and organic matter, overlooking other attributes. The research aimed to assess the effectiveness of multivariate analyses in classifying soils based on their responses to herbicide doses. Soil samples were collected from various regions in the Brazilian Midwest and underwent detailed physical and chemical analyses. An experiment was conducted, involving the application of increasing doses of the diclosulam, with sorghum used as a bioindicator plant. Statistical analyses, including correlation, principal component analysis, factor analysis, and clustering, were employed to identify the soil attributes most relevant to herbicide dose responses. The soil attributes that most significantly influenced responses to herbicide doses included Ca+Mg, P, pH, Na, CEC, OC, silt, Ca/K, and Mg/CEC. K-means clustering separated the soils into two distinct clusters, exhibiting varying levels of herbicide sensitivity and soil characteristics. The cluster with a lower pH required a higher dose to cause 80% intoxication in sorghum plants, indicating increased herbicide sorption in soils with lower pH and higher clay content. Multivariate analyses prove to be effective in categorizing soils based on their responses to the diclosulam doses.*

Keywords: *Multivariate Analysis. Spider®. Dose.*

Introdução

A recomendação das doses de herbicidas pré-emergentes é fundamental na agricultura e leva em conta a capacidade de retenção do solo. No entanto, as atuais diretrizes frequentemente se baseiam apenas na textura do solo e na quantidade de matéria orgânica, ignorando outros atributos relevantes que afetam a interação entre os herbicidas e o solo. Parâmetros como o pH (das Chagas *et al*., 2020), a Capacidade de Troca Catiônica (CTC) (Silva *et al*., 2019) e a mineralogia do solo (Carneiro *et al*., 2020) têm demonstrado influência significativa na sorção e dessorção de herbicidas. Portanto, recomendações baseadas exclusivamente na textura e na matéria orgânica podem resultar em doses inadequadas, levando a ineficiência no controle de ervas daninhas (subdosagem) ou contaminação ambiental (superdosagem).

Uma alternativa para determinar a sorção de herbicidas no solo é a avaliação por meio de ensaios biológicos. Nesse método, a capacidade de retenção do solo é avaliada comparativamente com um material inerte (que não retém o herbicida), usando plantas extremamente sensíveis ao herbicida como indicadoras para calcular a razão de sorção (Guerra *et al*., 2014). O método biológico se destaca em relação ao método analítico devido à sua simplicidade e custo reduzido. Além disso, leva em consideração o fator biológico, ou seja, a planta, para inferir a disponibilidade do herbicida no controle de ervas daninhas (Gheno *et al*., 2016). Para certos herbicidas, a sensibilidade das plantas indicadoras pode permitir a detecção de concentrações mais baixas em comparação com métodos analíticos tradicionais (Faria *et al*., 2018).

Embora o método biológico seja mais simples e econômico, sua implementação requer tempo e treinamento específico, o que limita seu uso por produtores, técnicos e agrônomos na definição das doses de herbicidas pré-emergentes. Uma solução para superar essa limitação no uso dos índices de retenção de herbicidas no solo é a modelagem de dados. Vários estudos têm aplicado análises estatísticas multivariadas, regressões lineares múltiplas e sistemas de aprendizado de máquina para estimar esses índices com base em atributos do solo (Xu *et al*., 2016). O objetivo deste estudo foi avaliar o potencial da combinação de análises multivariadas para agrupar solos com padrões semelhantes em relação às doses de diclosulam.

Material e Métodos

Amostras de solo foram coletadas em várias regiões do centro-oeste brasileiro, uma região de grande importância na produção de soja. As amostras foram obtidas na camada de 0-20 cm de

profundidade, em áreas que não haviam sido previamente tratadas com herbicidas. Os solos foram posteriormente secos ao ar, peneirados com uma malha de 2 mm e submetidos a análises físicas e químicas para sua caracterização, conforme descrito por Silva *et al*. (2009). Um total de 10 amostras de diferentes solos foram coletadas para o estudo.

O experimento foi conduzido em um delineamento inteiramente casualizado, com cinco repetições. Os tratamentos consistiram na combinação dos 10 tipos de solo com doses crescentes de diclosulam (Spider®). A unidade experimental foi um vaso com uma capacidade volumétrica de 0,5 dm^3, preenchido com 400 g de solo de cada tipo. O mesmo procedimento foi aplicado para o substrato inerte. Após o preenchimento dos vasos, sementes de sorgo (*Sorghum bicolor*), a planta bioindicadora escolhida, foram semeadas em cada unidade experimental. Três plantas por unidade experimental foram cultivadas por 21 dias após a aplicação de cada dose de diclosulam.

A umidade nas unidades experimentais foi mantida na capacidade de campo, determinada previamente para cada tipo de solo. Em seguida, o herbicida diclosulam foi aplicado na superfície do solo durante a fase de pré-emergência das plantas de sorgo. As doses aplicadas foram determinadas com base nas recomendações da bula comercial do herbicida, variando de 0 a 1,5 vezes a dose máxima recomendada. A intoxicação das plântulas foi avaliada 21 dias após a aplicação.

Para obter a dose necessária para causar 80% de intoxicação nas plantas de sorgo, foram aplicados modelos não-lineares hiperbólicos aos dados (dados não apresentados). Além disso, os atributos do solo foram submetidos a análises de correlação, análise de componentes principais, análise fatorial e análise de cluster. Médias e desvios padrão (média ± desvio padrão) para a dose necessária para causar 80% de intoxicação nas plantas de sorgo foram calculados para cada grupo de solos.

Resultados e Discussão

A análise de correlação permitiu a seleção de atributos do solo com base em suas fortes correlações entre si, conforme observado por das Chagas *et al*. (2020). Os atributos escolhidos incluíram Ca+Mg, S, P, pH, Na, capacidade de troca catiônica (CTC), matéria orgânica (M.O), argila, silte, Ca/Mg, Ca/K, Mg/CTC e K/CTC. Outros atributos do solo apresentaram correlações significativas com esses atributos mencionados anteriormente, o que levou à exclusão destes na Análise de Componentes Principais (ACP) (dados não apresentados). Após a seleção dos atributos, realizou-se a ACP, resultando na identificação de cinco componentes principais com autovalores superiores a 1 (dados não apresentados). Consequentemente, esses cinco fatores foram empregados na Análise Fatorial (AF).

Através da AF, foi possível identificar os atributos do solo com maior relevância, com cargas fatoriais superiores a 0,80, que incluíram Ca+Mg, P, pH, Na, CTC, M.O, silte, Ca/K e Mg/CTC (conforme apresentado na Tabela 1). Esses atributos demonstraram ser mais capazes de explicar as variações entre os solos analisados. Estudos prévios indicaram que as variáveis com maior importância na AF têm o potencial de agrupar indivíduos com maior similaridade entre si. Assim, os atributos do solo destacados pela AF foram empregados na análise de cluster para agrupar os diferentes tipos de solos estudados.

Tabela 1 – Importância dos atributos do solo em cada fator segundo análise fatorial considerando a rotação varimax

	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 4	Fator 5
Ca+Mg	0.34	0.88	0.24	-0.20	0.12
S	0.24	-0.27	-0.17	0.62	0.59
P	0.01	-0.10	0.02	-0.07	-0.98
pH	0.83	0.01	0.07	0.30	0.46
Na	0.03	-0.17	-0.97	0.06	0.05
CTC	-0.30	0.84	0.21	-0.16	-0.33
M.O	0.27	0.89	0.12	0.09	0.12
Argila	0.25	0.22	0.48	0.74	0.01
Silte	0.88	0.40	-0.06	0.04	-0.17

Ca/Mg	0.44	-0.11	0.05	0.73	0.42
Ca/K	0.16	0.80	-0.54	-0.12	-0.07
Mg/CTC	0.09	0.20	0.14	-0.95	-0.01
K/CTC	0.32	-0.54	0.48	0.18	0.56

* valores destacados em vermelho indicam os atributos com maior importância pela análise fatorial. * Critério varimax foi adotado para rotação dos fatores.
Fonte: autoria própria

A análise de agrupamento *k-means* conduziu à segregação de dois grupos com maior similaridade nos atributos Ca+Mg, P, pH, Na, CTC, M.O, silte, Ca/K e Mg/CTC. Os atributos que mais divergiram entre os grupos (cluster 1 e cluster 2) foram pH, M.O e silte, conforme evidenciado na Figura 1. Além disso, os grupos resultantes da análise *k-means* demonstraram disparidades em relação à dose necessária para causar 80% de intoxicação nas plantas de sorgo. O cluster 1 exibiu uma média de dose de 62,7 ± 23,2 L ha-1 para atingir 80% de intoxicação nas plantas de sorgo. Em contraste, o cluster 2 apresentou uma média inferior de dose requerida para atingir 80% de intoxicação na planta bioindicadora, com um valor médio de 29,9 ± 18,3 L ha-1 (conforme mostrado na Figura 1).

A maior dose exigida no cluster 1 pode estar associada aos solos com pH mais baixo. Em solos com pH reduzido, ocorre uma maior sorção do diclosulam, uma vez que o herbicida tende a permanecer em seu estado molecular, possibilitando uma maior capacidade de sorção. Em contrapartida, em solos com pH mais elevado, como observado no cluster 2, a molécula do diclosulam adquire uma carga residual negativa, diminuindo a sorção devido à repulsão dessas moléculas pelas cargas negativas presentes no solo (das Chagas *et al*., 2020; Carneiro *et al*., 2020).

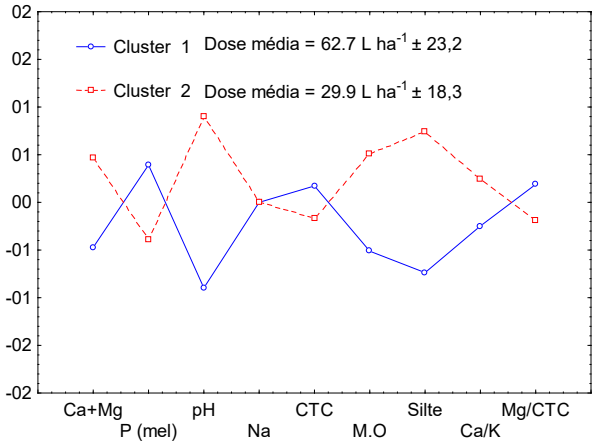

Figura 1 – Médias para os atributos do solo e dose (média ± desvio padrão) de cada grupo obtido a partir das variáveis mais importantes pela análise fatorial segundo agrupamento *k-means*
Fonte: autoria própria

A menor proporção de partículas de silte e uma CTC (Capacidade de Troca Catiônica) mais elevada no cluster 1 indicam a presença de solos com maior teor de argila. Solos com essa composição tendem a apresentar uma maior capacidade de adsorção do diclosulam, resultando na redução da disponibilidade do herbicida para o controle de plantas daninhas. Essa característica também pode ter contribuído para a necessidade de doses mais elevadas do herbicida nos solos pertencentes ao cluster 1, a fim de alcançar 80% de intoxicação nas plantas de sorgo.

Conclusão

A fusão das avaliações de componentes principais, fatoriais e de agrupamento demonstrou ser eficaz na categorização de solos com padrões semelhantes em relação à dose requerida de diclosulam para induzir 80% de intoxicação na planta indicadora.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade de Rio Verde, ao Programa de Pós-Graduação de Produção Vegetal da UniRV e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pelo suporte a execução do projeto.

Referências Bibliográficas

CARNEIRO, G. D. O. P. *et al*. Herbicide mixtures affect adsorption processes in soils under sugarcane cultivation. Geoderma, v. 379, p. 114626, 2020.

DAS CHAGAS, P. S. F. *et al*. increases in pH, Ca^{2+}, and Mg^{2+} alter the retention of diuron in different soils. Catena, v. 188, p. 104440, 2020.

FARIA, A. T. *et al*. Tebuthiuron leaching in three brazilian soils as affected by soil pH. Environmental Earth Sciences, v. 77, n. 5, p. 1-12, 2018.

GHENO, E. A. *et al*. Residual activity of herbicides applied to cotton on crops cultivated in succession. Revista Caatinga, v. 29, n. 1, p. 143-152, 2016.

GUERRA, N. *et al*. Sensibility of plant species to herbicides aminocyclopyrachlor and indaziflam. Planta Daninha, v. 32, n. 3, p. 609-617, 2014.

SILVA, F. C. S. *et al*. (ED.). Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009.

SILVA, T. S. *et al*. Use of neural networks to estimate the sorption and desorption coefficients of herbicides: a case study of diuron, hexazinone, and sulfometuron-methyl in brazil. Chemosphere, v. 236, p. 124333, 2019.

XU, X. *et al*. Soil properties control decomposition of soil organic carbon: results from data-assimilation analysis. Geoderma, v. 262, p. 235-242, 2016.