

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
CAMPUS DE MARECHAL CÂNDIDO RONDON**

MARCOS MASSUO KASHIWAQUI

**RELAÇÕES ENTRE ATRIBUTOS FÍSICO-QUÍMICOS DO SOLO E DE
Pratylenchus brachyurus NA CULTURA DA SOJA**

**MARECHAL CÂNDIDO RONDON - PARANÁ
2021**

MARCOS MASSUO KASHIWAQUI

**RELAÇÕES ENTRE ATRIBUTOS FÍSICO-QUÍMICOS DO SOLO E DE
Pratylenchus brachyurus NA CULTURA DA SOJA**

Tese apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Dr. Antonio Carlos Torres da
Costa

Coorientadores: Dr. Jerry Adriani Johann
Dr. Odair José Kuhn

MARECHAL CÂNDIDO RONDON - PARANÁ

2021

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

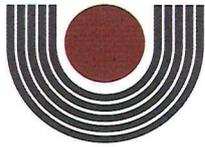
Kashiwaqui, Marcos Massuo

Relações entre atributos físico-químicos do solo e de *Pratylenchus brachyurus* na cultura da soja / Marcos Massuo Kashiwaqui; orientador(a), Antonio Carlos Torres da Costa; coorientador(a), Jerry Adriani Johann, coorientador(a)II, Odair José Kuhn, 2021.

64 f.

Tese (doutorado), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus Marechal Cândido Rondon, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, 2021.

1. Nematóide das lesões radiculares. 2. Atributos de solo. 3. Descoberta de conhecimento em banco de dados. 4. Classificação. I. Costa, Antonio Carlos Torres da. II. Johann, Jerry Adriani. III. Kuhn, Odair José. IV. Título.



unioeste

Universidade Estadual do Oeste do Paraná

Campus de Marechal Cândido Rondon - CNPJ 78680337/0003-46

Rua Pernambuco, 1777 - Centro - Cx. P. 91 - <http://www.unioeste.br>

Fone: (45) 3284-7878 - Fax: (45) 3284-7879 - CEP 85960-000

Marechal Cândido Rondon - PR.



MARCOS MASSUO KASHIWAQUI

Relações entre atributos físico-químicos do solo e de *Pratylenchus brachyurus* na cultura da soja

Tese apresentada à distância, de forma síncrona e por videoconferência, conforme Resolução nº 052/2020 – CEPE, ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Doutor em Agronomia, área de concentração Produção Vegetal, linha de pesquisa Manejo de Culturas, APROVADO pela seguinte banca examinadora:

Orientador - Antonio Carlos Torres da Costa

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Marechal Cândido Rondon (UNIOESTE)

José Barbosa Duarte Júnior

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Marechal Cândido Rondon (UNIOESTE)

José Renato Stangarlin

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Marechal Cândido Rondon (UNIOESTE)

André Vinicius Zabini

Laboratório Agronômico (Hernandarias – Paraguai)

Éder Comunello

Empresa brasileira de pesquisa agropecuária (EMBRAPA)

Neumárcio Vilanova da Costa

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Agronomia

Marechal Cândido Rondon, 25 de fevereiro de 2021

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida;

A minha família, pelo incentivo, apoio, amor e carinho de sempre;

Ao meu orientador, Prof. Dr. Antonio Carlos Torres da Costa pelos ensinamentos, paciência e apoio;

Aos Professores Doutores, Jerry Adriani Johann e Odair José Kuhn pela gentileza e disposição para a coorientação da minha tese;

Aos colegas de curso, pela convivência e companheirismo ao longo desta jornada;

A família Wazlawick, especialmente ao Fernando pela cedência da área estudada, pelo suporte e apoio logístico durante as coletas de dados;

Aos Biólogos Diego Cabral dos Santos e José Lucas Errera Gomes pelo auxílio nas coletas campo;

A Copagril por disponibilizar os dados meteorológicos;

A BR Sul Cereais pela pesagem e determinação de umidade de grãos;

Ao Laboratório Agronômico, Hernandarias/Paraguai – pelo convênio firmado para desenvolvimento de projetos;

A UEMS - Unidade universitária de Mundo Novo/MS, por autorizar o uso de sua infraestrutura e as Professoras Doutoradas Elaine, Milza e Valéria responsáveis pelo Laboratório de Ecologia;

Aos docentes e as secretárias acadêmicas do PPGA, pelo compartilhamento de conhecimento e atenção dirigida aos discentes;

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da UNIOESTE/Marechal Cândido Rondon (PPGA), pela oportunidade e estrutura;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pela bolsa concedida.

RESUMO

KASHIWAQUI, M.M. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, fevereiro - 2021. **Relações entre atributos físico-químicos do solo e de *Pratylenchus brachyurus* na cultura da soja.** Orientador: Antonio Carlos Torres da Costa. Coorientadores: Jerry Adriani Johann; Odair José Kuhn.

O Brasil é um dos grandes produtores mundiais de soja, porém algumas pragas e doenças são motivos de preocupação no ambiente de produção dessa oleaginosa. O nematoide das lesões radiculares é um exemplo disso, uma vez que os principais métodos de controle utilizados apresentam limitações para o manejo desses organismos. O manejo adequado de atributos químicos do solo pode contribuir positivamente para o manejo de *Pratylenchus brachyurus*, pela redução da sua população e dos danos, bem como por melhorar o desenvolvimento da cultura. Alguns avanços recentes, como a agricultura de precisão e a descoberta de conhecimento em banco de dados (KDD), podem contribuir para a identificação de fatores que atuam para a disseminação de nematoides. O objetivo deste estudo foi obter relações entre atributos físico-químico e a densidade populacional de *P. brachyurus*, com uso da técnica de árvore de decisão, em uma área cultivada com soja em Mundo Novo/MS. A coleta de dados foi realizada na safra 2018/19. Foi realizada a análise geoestatística dos atributos, pH, fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), acidez potencial (H+Al), alumínio (Al), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação por bases (V), teor de areia, silte, argila e número de indivíduos de *P. brachyurus*. O mapeamento foi realizado pelo método de krigagem ordinária. A árvore de decisão foi modelada com o uso do *software* Weka. A densidade do nematoide, atributo classe, foi categorizada em duas classes, “Alta” e “Baixa”, com uso do algoritmo EM (*Expectation-Maximization*). O desbalanceamento nos dados foi minimizado com uso do filtro *resample*, e, para a seleção de atributos, foi adotado o método *Wrapper*. A árvore de decisão foi modelada com uso do classificador J48 e avaliados pela acurácia, índice *Kappa*, precisão e *recall*. Na análise geoestatística foram observados predominância dos modelos gaussiano e esférico, para cinco e quatro atributos, respectivamente. O modelo Matérn foi observado em dois atributos, enquanto para o silte e a densidade de *P. brachyurus*, não foram observadas dependência espacial, efeito pepita puro. Com relação ao grau de dependência espacial, destacaram os atributos físicos areia, argila, além dos atributos químicos H+Al e CTC, com dependência espacial forte, enquanto os demais atributos químicos se apresentaram

de forma moderada. A árvore de decisão gerada com uso do classificador J48 teve 91,99% de acurácia e 0,81 de índice *Kappa*, já as classes “Alta” e “Baixa” apresentaram 0,96 e 0,84 de precisão, bem como 0,93 e 0,90 para *recall*, respectivamente. A árvore de decisão obtida possibilitou a identificação de cinco regras de classificação, com participação dos atributos pH, P e K, em cinco, três e duas regras, respectivamente. Na análise geoestatística, os atributos de maior continuidade espacial foram, areia e argila, enquanto a maior parte dos atributos químicos foram identificados com dependência moderada. A densidade populacional de *P. brachyurus* não pode ser mapeada em função do efeito pepita puro. A técnica de árvore de decisão se mostrou promissora e possibilitou a identificação dos atributos pH, P e K, que se relacionaram com a densidade populacional de *P. brachyurus*.

Palavras-chave: Nematoides. Geoestatística. Árvore de decisão. Weka. Mineração de dados.

ABSTRACT

KASHIWAQUI, M.M. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, fevereiro - 2021. **Relationships between soil physicochemical attributes and *Pratylenchus brachyurus* in soybean culture.** Advisor: Antonio Carlos Torres da Costa. Co-Advisors: Jerry Adriani Johann and Odair José Kuhn.

Brazil is one of the major world producers of soy, however some pests and diseases are of concern in the production environment of this oilseed. The root lesion nematode is an example of this, since the main control methods used have limitations for the management of these organisms. Proper management of soil chemical attributes can positively contribute to the management of *Pratylenchus brachyurus*, by reducing its population and damage, as well as improving crop development. Some recent advances, such as precision agriculture and the discovery of knowledge in databases (KDD), can contribute to the identification of factors that act for the spread of nematodes. The objective of this study was to obtain relations between physical-chemical attributes and the population density of *P. brachyurus*, using the decision tree technique, in an area cultivated with soy in Mundo Novo/MS. Data collection was carried out in the 2018/19 harvest. Geostatistical analysis of the attributes, pH, phosphorus (P), potassium (K), calcium (Ca), magnesium (Mg), potential acidity (H + Al), aluminum (Al), cation exchange capacity (CTC) was performed, base saturation (V), content of sand, silt, clay and number of individuals of *P. brachyurus*. The mapping was performed using the ordinary kriging method. The decision tree was modeled using the Weka software. The nematode density, class attribute, was categorized into two classes, "High" and "Low", using the EM (Expectation-Maximization) algorithm. The imbalance in the data was minimized with the use of the resample filter, and for the selection of attributes, the Wrapper method was adopted. The decision tree was modeled using the J48 classifier and evaluated for accuracy, Kappa index, precision and recall. In the geostatistical analysis, a predominance of the gaussian and spherical models was observed, for 5 and 4 attributes, respectively. The Matérn model was observed in 2 attributes, while for the silt and the density of *P. brachyurus*, no spatial dependence, pure nugget effect was observed. Regarding the degree of spatial dependence, the physical attributes of sand and clay were highlighted, in addition to the chemical attributes H + Al and CTC, with strong spatial dependence, while the other chemical attributes were presented in a moderate way. The decision tree generated using the J48 classifier had 91.99% accuracy and 0.81 Kappa index,

whereas the “High” and “Low” classes showed 0.96 and 0.84 accuracy, as well as 0.93 and 0.90 for recall, respectively. The decision tree obtained enabled the identification of 5 classification rules, with the participation of the attributes pH, P and K, in 5, 3 and 2 rules, respectively. In the geostatistical analysis, the attributes of greater spatial continuity were sand and clay, while most of the chemical attributes were identified with moderate dependence. The population density of *P. brachyurus* could not be mapped due to the pure nugget effect. The decision tree technique proved to be promising and made it possible to identify the pH, P and K attributes, which were related to the population density of *P. brachyurus*.

Key words: Nematodes. Geostatistics. Decision tree. Weka. Data mining.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Exemplo teórico de um semivariograma, com seus respectivos parâmetros (Adaptado de CAMARGO, 1998).	12
Figura 2. Representação gráfica dos modelos experimentais exponencial, gaussiano e esférico (Adaptado de GREGO et al., 2014).	14
Figura 3. Etapas do processo de descoberta de conhecimento em base de dados (Adaptado de FAYYAD et al., 1996).....	18
Figura 4. Estrutura básica de uma árvore de decisão, com os nós de decisão (nó raiz e nó interno), ramos e folhas (Adaptado de TAN et al., 2009).	20
Figura 5. Mundo Novo/MS e o Sítio Nova Esperança. (Fonte: NEXTGIS, 2018).	25
Figura 6. Dados de temperatura mínima e máxima e precipitação pluviométrica, de Mundo Novo/MS de outubro a janeiro, safra 2018/19 (Fonte: Copagril).	26
Figura 7. Contorno do talhão de estudo e representação da grade amostral (Fonte: NEXTGIS, 2018).	28
Figura 8. Janela de Seleção de atributos do <i>software</i> Weka, utilizando o método de agrupamento EM (<i>Expectation-Maximization</i>).....	32
Figura 9. Console para configuração do filtro não-supervisionado <i>InterquartilRange</i> , da janela de pré-processamento do <i>software</i> Weka.	33
Figura 10. Console para configuração do filtro supervisionado <i>Resample</i> , da janela de pré-processamento do <i>software</i> Weka.....	34
Figura 11. Janela de Seleção de atributos do <i>software</i> Weka, utilizando o método <i>Wrapper</i> (J48) e os atributos selecionados: pH, P e K.....	35
Figura 12. Janela de classificação do <i>software</i> Weka, com a aplicação do método J48 e parâmetros de desempenho do classificador.	36
Figura 13. Semivariogramas ajustados dos atributos físico-químicos e densidade populacional de <i>Pratylenchus brachyurus</i> . P: fósforo; K: potássio; Ca: cálcio; Mg: magnésio; Al: Alumínio; H+Al: acidez potencial; CTC: capacidade de troca catiônica; e, V: saturação por bases. Fonte: Dados da pesquisa (2021).....	44
Figura 14. Mapas de distribuição espacial dos atributos físico-químicos do solo. P: fósforo; K: potássio; Ca: cálcio; Mg: magnésio; Al: Alumínio; H+Al: acidez potencial; CTC: capacidade de troca catiônica; e, V: saturação por bases. Fonte: Dados da pesquisa (2021).....	46

Figura 15. Árvore de decisão (J48), gerada no *software* Weka, sobre os níveis de densidade populacional de *Pratylenchus brachyurus*. Atributos pH (CaCl₂), fósforo (P) e potássio (K). Fonte: Dados da pesquisa (2021).48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Exemplo de matriz de confusão para problemas de duas classes (ROKACH; MAIMON, 2014)	23
Tabela 2. Análise descritiva, com os valores mínimos e máximos, média, mediana, coeficiente de variação (CV), coeficiente de assimetria (Cs), coeficiente de curtose (Ck) e estatística do teste de <i>Kolmogorov-Smirnov</i> (D) dos atributos do solo e densidade populacional de <i>Pratylenchus brachyurus</i>	39
Tabela 3. Parâmetros geoestatísticos dos variogramas omnidirecionais ajustados aos atributos físico-químicos e densidade populacional de <i>Pratylenchus brachyurus</i>	43
Tabela 4. Resultado da árvore de decisão por validação cruzada ($k = 5$) e os parâmetros de avaliação acurácia, índice <i>Kappa</i> , precisão e <i>recall</i>	47
Tabela 5. Regras de classificação obtidas pela indução do algoritmo J48 para a densidade populacional de <i>Pratylenchus brachyurus</i>	48

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 EXPANSÃO DO CULTIVO DA SOJA NO BRASIL	4
2.2 MANEJO CONSERVACIONISTA DO SOLO	5
2.3 NEMATOIDES FITOPARASITAS	6
2.4 AGRICULTURA DE PRECISÃO E GEOESTATÍSTICA	11
2.5 DESCOBERTA DE CONHECIMENTO EM BANCO DE DADOS (KDD)	17
3 MATERIAL E MÉTODOS	25
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO	25
3.2 LOCAL DO ESTUDO	26
3.3 AMOSTRAGEM	27
3.4 ANÁLISE DESCRITIVA	29
3.5 ANÁLISE GEOESTATÍSTICA	29
3.6 CLASSIFICAÇÃO PELA INDUÇÃO DE ÁRVORES DE DECISÃO	30
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1 ANÁLISE DESCRITIVA	38
4.2 ANÁLISE GEOESTATÍSTICA	42
4.3 ÁRVORE DE DECISÃO	46
5 CONCLUSÕES	54
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

1 INTRODUÇÃO

O Brasil tem se destacado nas últimas décadas como um dos grandes produtores mundiais de soja. Na safra 2019/20, o país foi o maior exportador e produtor mundial dessa *commoditie*, com 124,8 milhões de toneladas produzidas (CONAB, 2021).

No entanto, algumas pragas e doenças causam perdas consideráveis em áreas de cultivo da soja. Os danos causados por nematoides fitoparasitas, que acometem o sistema radicular de plantas e podem ter os sintomas confundidos com deficiências nutricionais, são caracterizados pela formação de reboleiras com plantas raquíticas e menos resistentes ao estresse hídrico, em relação às plantas normais, bem como o intenso abortamento de flores e vagens (LOPES et al., 2017).

Para se ter a dimensão do problema causado por esses organismos, os nematoides *Meloidogyne javanica*, *M. incognita*, *Heterodera glycines* e *Pratylenchus brachyurus*, foram catalogados entre os maiores causadores de riscos fitossanitários de importância econômica na agricultura brasileira, de forma que receberam prioridade para registro de produtos e tecnologias de controle (BRASIL, 2015; BRASIL, 2016).

Pratylenchus brachyurus, conhecido como nematoide das lesões radiculares, é um nematoide endoparasita migrador, que devido ao seu hábito alimentar polífago, pode sobreviver e multiplicar-se em grande parte das espécies, cultivadas ou não (CASTILHO; VOVLAS, 2007). Essa espécie foi favorecida por diversas características encontradas no sistema de produção de soja, tais como a semeadura direta, ausência de rotação de culturas, caracterizada pela monocultura ou sucessão entre duas espécies hospedeiras, incorporação de áreas de pastagens degradadas e o cultivo em solos com baixos teores de argila (JUHÁSZ et al., 2013).

Os principais métodos recomendados para o controle de fitonematoides envolvem a utilização de cultivares resistentes, nematicidas e a inclusão de espécies antagonistas na rotação de culturas. No entanto, para *P. brachyurus*, a efetividade desses métodos de controle é limitada, devido à dificuldade de identificação de cultivares de soja com tolerância ou resistência a esse nematoide, aos resultados inconsistentes observados pelo uso de nematicidas, bem como pela falta de opções viáveis, economicamente, para incluir na rotação de culturas, restrita a poucas

espécies de *Crotalaria* spp. (DEBIASI et al., 2016a). Uma das possíveis explicações para esse diagnóstico, se deve a grande variabilidade de *P. brachyurus*, que podem influenciar a agressividade e o comportamento reprodutivo, além de alterações morfológicas e morfométricas, entre diferentes populações da espécie (MACHADO et al., 2015).

Uma importante forma de minimizar os efeitos da presença de nematoides é o manejo de fertilidade do solo. A acidez do solo (pH), além de afetar a disponibilidade de Ca e Mg e sobre o teor de Al, contribui para aumentar a intensidade dos sintomas ocasionados à soja por *P. brachyurus* (DEBIASI et al., 2016b).

Com os avanços recentes, o desenvolvimento da agricultura de precisão, baseado na amostragem georreferenciada e a utilização de sistemas de informações geográficas, contribui para identificação do padrão de distribuição espacial, bem como para a identificação de fatores que atuam na disseminação de nematoides (FREITAS et al., 2019).

Matos et al. (2011), ao estudarem os efeitos da aplicação de vinhaça, observaram coeficientes de correlação significativa entre a densidade de *Pratylenchus* sp. com a matéria orgânica, P e pH. Este último é importante componente da acidez potencial, que também pode ser correlacionada à densidade desse fitoparasita (FRANCHINI et al., 2018).

Dessa maneira, em alguns estudos não são observadas relações entre a densidade populacional do nematoide fitoparasita e atributos químicos e/ou físicos do solo (DEBIASI et al., 2014). Por outro lado, Kandel et al. (2018), identificaram relações entre atributos químicos e físicos com a população de *Pratylenchus* spp., pelo uso de árvore de decisão. Dentre as características do método, os autores destacam que a árvore de decisão se constitui em ferramenta estatística robusta para identificar padrões e relacionamentos significativos, bem como para explorar a estrutura não revelada nos dados.

A base de cálculo para a construção de uma árvore de decisão se dá em função da razão de ganho de informação e redução de entropia (QUINLAN, 1993), enquanto a estrutura da árvore é constituída de uma cadeia de nós de decisão, que se inicia pelo nó raiz, atributo de menor entropia, que se conecta a outros nós por ramificações e se estende até os nós folha, onde termina a árvore.

O método da árvore de decisão é um dos métodos mais utilizados no contexto de mineração de dados, cuja construção é realizada com base numa abordagem recursiva de particionamento do conjunto de dados (GOLDSCHMIDT et al., 2015).

Dessa forma, o desenvolvimento deste trabalho partiu da hipótese de que a adoção da técnica de árvore de decisão pode contribuir para a identificação de padrões entre atributos físico-químicos de solo e a densidade populacional de *P. brachyurus* numa área de produção de soja.

O objetivo deste estudo foi descobrir relações entre atributos físico-químico e a densidade populacional de *P. brachyurus*, com uso da técnica de árvore de decisão, em uma área cultivada com soja em Mundo Novo/MS.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 EXPANSÃO DO CULTIVO DA SOJA NO BRASIL

A soja [*Glycine max* (L.) Merrill], pertencente à família Fabaceae (Leguminosae), tem o centro de origem no continente asiático, porém o seu cultivo foi difundido, tornando-se uma *commoditie*. Atualmente, o continente americano se destaca na produção dessa *commoditie*, uma vez que os países responsáveis pelas maiores produções no mundo estão nesse continente. A safra brasileira de soja 2019/20 foi de 124,8 milhões de toneladas (CONAB, 2021).

A evolução da produção de soja no Brasil, deu-se a partir da região Sul do país, que era responsável por praticamente 80% da produção nacional no início da década de 1980. A partir de meados dessa década houve o avanço para outras regiões, especialmente para o Centro-Oeste. Nesta região, já, no início do século XXI, ultrapassou a região Sul em participação na produção dessa oleaginosa e, atualmente, aproxima-se da metade da produção nacional na safra 2019/20, com 60,7 milhões de toneladas produzidas (CONAB, 2021).

A migração do cultivo da soja para outras regiões do país se deve à incorporação de áreas anteriormente ocupadas com outras explorações agropecuárias. Dessa forma, destacam-se as condições encontradas nas áreas já consolidadas de pastagens degradadas, uma vez que as baixas eficiências técnica e econômica de grande parte das áreas destinadas à exploração pecuária, amparavam a tomada de decisão pela conversão para o cultivo da oleaginosa (HIRAKURI; LAZZAROTTO, 2014). Essa tendência continuou sendo predominante, uma vez que, na primeira década do século XXI, mais da metade do incremento na área de produção de soja, no cerrado brasileiro, deve-se à incorporação de áreas de pastagens (CARNEIRO FILHO; COSTA, 2016).

De acordo com Donagemma et al. (2016), uma característica importante a ser considerada no processo de migração da sojicultura no Brasil, é o cultivo em solos de textura média e arenosa, como ocorre em parte da região produtora no Centro-Oeste, bem como na região de Matopiba, que compreende o Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia, considerada última grande fronteira agrícola do país. Os autores destacam que esses solos apresentam fragilidades, com limitações de manejo, tais como a

deficiência hídrica e suscetibilidade a erosão, bem como limitações de fertilidade, o que confere limitações de natureza química do solo.

2.2 MANEJO CONSERVACIONISTA DO SOLO

De acordo com Novais et al. (2007), o desenvolvimento de plantas pode ser influenciado por uma série de fatores que se estendem desde os fatores climáticos, ligados à própria planta ou propriedades e características do substrato onde a planta se desenvolve. Os autores argumentam que existem mais de uma centena de atributos ligados ao solo que podem interferir nesse processo, dos quais, alguns podem ser controlados pela adoção de práticas de manejo do solo, tais como o sistema de semeadura direta (SSD) e a rotação de culturas.

Hernani et al. (1997), estudaram a influência do sistema de cultivo do solo para determinar as perdas de solo e água, além dos efeitos sobre o rendimento de cultivos, em Dourados/MS. Os autores concluíram que o SSD foi mais eficaz no controle das perdas de solo e água por erosão, bem como proporcionou maiores rendimentos da soja e trigo, superando os demais sistemas de preparo de solo utilizados.

Em estudo realizado para verificar o efeito da aplicação de resíduos de plantas no solo, Franchini et al. (1999) verificaram aumento no pH, nos teores de Ca, Mg e K trocáveis, bem como a redução de Al. A matéria orgânica, produzida pela decomposição de resíduos vegetais, apresenta alta capacidade de interagir com os demais componentes químicos, físicos e biológicos do solo, com reflexos sobre o crescimento das plantas (NOVAIS et al., 2007).

De acordo com Santos et al. (2006), em sistemas de manejo conservacionistas, quando associados à manutenção de palhada, podem afetar positivamente as características físicas, químicas e biológicas de solo. Os autores observaram que a combinação de sistema conservacionista de manejo do solo, SSD e cultivo mínimo, com a rotação de culturas, favorece maior rendimento da soja.

Franchini et al. (2011), consideram que a rotação de culturas, juntamente com a cobertura permanente produzida por essa prática, é um princípio básico para o êxito do SSD, uma vez que as duas contribuem para minimizar alterações físicas, químicas e biológicas no solo, tais como a redução no teor de matéria orgânica do solo,

degradação da estrutura do solo, intensificação dos processos erosivos e, redução da atividade biológica.

Outra importante prática a ser realizada, em áreas de cultivo de soja, é a correção de acidez do solo. De acordo com Gitti et al. (2018), no Mato Grosso do Sul, essa prática é considerada fundamental, uma vez que na região é predominante solos de baixa fertilidade, elevada acidez e presença de alumínio tóxico. A realização da calagem, possibilita a exploração racional de uma área de cultivo, visto que reduz os efeitos da acidez do solo, diminuindo a concentração de elementos, na solução do solo, que se apresentem sob níveis tóxicos, tal como ocorre com o Al (SFREDO, 2008).

Nas plantas, a presença do Al em níveis tóxicos pode inibir o crescimento da raiz em profundidade, o que pode limitar a tolerância à seca e ciclagem de nutrientes, podendo interferir, ainda, na disponibilidade de outros nutrientes, como o macronutriente fósforo, que ao reagir com o Al solúvel, forma fosfatos de Al de baixa solubilidade (VIVIANI et al., 2010).

De acordo com Novais et al. (2007), em solos com valores de pH abaixo de 5,5, ocorre o aumento da solubilidade do alumínio tóxico, enquanto, na faixa de pH entre 5,5 e 6,5, ocorre a precipitação do Al, que favorece o desenvolvimento da maioria das espécies cultivadas. Além disso, os autores destacam que para a grande parte dos nutrientes, tais como ocorre com o fósforo (P) e o potássio (K) a maior disponibilidade é verificada na faixa de pH entre 6,0 e 6,5.

Nesse sentido, Nolla et al. (2020) observaram os efeitos da correção da acidez submetido a calagem, baseada no aumento da saturação por bases (V), em latossolo vermelho distrófico, com 127 g kg^{-1} . Os autores relataram a neutralização do Al tóxico, pela aplicação da dosagem para elevar V para 50%. A aplicação das doses mais elevadas, que visavam a elevar V para 70 e 80%, além do aumento do pHCaCl_2 para 6,6 e 7,1, respectivamente, provocaram reduções nas disponibilidades de P e K.

2.3 NEMATOIDES FITOPARASITAS

Os nematoides são vermes cilíndricos, que apresentam a forma do corpo comumente referida como filiforme. Esses organismos são de origem aquática, podendo ser encontrados em oceanos, mares, rios, lagos, solo, bem como em estruturas de plantas, como nas folhas, ou sob limitada disponibilidade de umidade,

tal como em sementes e outros órgãos vegetais armazenadas. No entanto, a grande maioria dos nematoides parasitas de plantas tem como alvo preferencial o parasitismo do sistema radicular das plantas e outros órgãos subterrâneos, como tubérculos, rizomas ou frutos hipógeos (FERRAZ; BROWN, 2016).

Os sintomas de danos causados por esses fitoparasitas, inicia-se, na forma de reboleiras, onde as plantas se apresentam subdesenvolvidas. Essa é uma característica dos nematoides, que apresentam distribuição tipicamente agregada (FERRAZ; BROWN, 2016). Além disso, as flutuações nas populações desses organismos podem ser influenciadas por inúmeras interações com a planta hospedeira, sazonalidade, condições climáticas, propriedades químicas e físicas de solo, bem como a presença de outros microrganismos (LAUGHLIN; LORDELLO, 1977; FERRAZ; BROWN, 2016).

As perdas anuais decorrentes do parasitismo de nematoides, baseado em 40 dos mais importantes cultivos agrícolas, foram estimados em 13,5% da produção, com prejuízo calculado em até 358 bilhões de dólares ao ano, no período que compreendeu os anos de 2010 a 2013 (ABD-ELGAWAD; ASKARY, 2015). No Brasil, as espécies que causam os maiores danos são *Meloidogyne* spp., *H. glycines*, *P. brachyurus* e *Rotylenchulus reniformis* (DIAS et al., 2010).

Segundo Juhász et al. (2013), uma das espécies que mais tem se destacado nos últimos anos, os nematoides-das-lesões-radulares, *P. brachyurus*, têm causado perdas econômicas devido aos danos elevados e crescentes, em várias regiões do Brasil, especialmente no cerrado.

Os prejuízos causados por *P. brachyurus* podem ser observados em diversas espécies cultivadas, tais como a soja, algodão, milho, feijão, amendoim, batata, fumo, eucalipto, seringueira, guandu, arroz, abacaxi, hortaliças, cana-de-açúcar e café (GOULART, 2008). Em poáceas utilizadas para produção de pastagens cultivadas de ciclo perene, destaca-se a multiplicação dessa espécie de nematoide em *Panicum maximum* e *Urochloa* spp. (INOMOTO et al., 2007; QUEIRÓZ et al., 2014), que representam 97,3% da produção de sementes destinadas para a implantação de áreas de pastagem perene do país (JANK et al., 2014).

Castilho e Vovlas (2007) ressaltam que este endoparasita migrador e polífago se destaca pela ampla distribuição em quase todos os ambientes frios, temperados e tropicais. Os danos causados por *Pratylenchus* spp., resultam das ações espoliadora, pela alimentação e consumo do conteúdo celular, mecânicas, pelo uso do estilete e

movimentação de todo o corpo, e tóxica, que provoca degradação enzimática das paredes celulares vegetais (GOULART, 2008). Além disso, a habilidade de migração desses nematoides persiste durante todo o seu ciclo de vida, isso permite a infecção do sistema radicular a qualquer momento, ou simplesmente estender os danos na estrutura radicular já infectada, pela migração ao longo do interior do tecido radicular (GOULART, 2008).

De acordo com Goulart (2008), o ciclo de vida de *Pratylenchus* spp. é de três a quatro semanas em média, o que significa que pode completar várias gerações ao longo de um ciclo cultural. O autor relata a capacidade de oviposição de uma fêmea varia de 80 a 150 ovos, ao longo da vida.

Outros fatores que podem favorecer a ocorrência de *P. brachyurus*, é o cultivo de espécies hospedeiras em solos ácidos e de textura arenosa. Em condições de solo ácido, por exemplo, ocorre aumento da vulnerabilidade da planta ao nematoide, por causa do aumento no teor de alumínio ou pela redução no teor de bases trocáveis no solo (FRANCHINI et al., 2011).

Em função das características ecológicas do nematoide das lesões radiculares, bem como pelas características edáficas, como os solos ácidos e de textura arenosa, e de manejo, como a semeadura direta e cultivos empregados nessas áreas, os prejuízos causados por esse nematoide não se caracterizam como uma situação aleatória, uma vez que *P. brachyurus* foi muito beneficiado por mudanças no sistema de produção (JUHÁSZ et al., 2013).

Dentre as principais estratégias para o manejo de nematoides estão o uso de genótipos resistentes e a rotação de culturas com espécies não hospedeiras (FERRAZ; BROWN, 2016). No entanto, para nematoides do gênero *Pratylenchus*, a inexistência de genótipos resistentes de soja (DIAS et al., 2010) representa dificuldade para a implementação de uma estratégia de manejo desse nematoide, uma vez que seu manejo fica restrito a poucas espécies de plantas de cobertura, tal como ocorre com algumas espécies de crotalárias (DEBIASI et al., 2016a; JUHÁSZ et al., 2013; COSTA et al., 2014).

Outras estratégias são adotadas para o manejo de nematoides, tais como o controle químico e biológico. O controle químico, por exemplo, tem seu uso cada vez mais restrito, uma vez que representam riscos à segurança ambiental e para a saúde humana e animal, além da perda na eficiência de controle, após repetidas aplicações (DONG; ZHANG, 2006). Uma mudança observada nos últimos anos, envolve o

cancelamento por órgãos reguladores desses produtos e liberações de nematicidas químicos de menor toxicidade, além de nematicidas de origem biológica.

O controle biológico, por sua vez, envolve o uso de organismos vivos, nativos ou introduzidos, no ambiente, com o objetivo de minimizar os impactos negativos causados por determinados organismos que reduzem a capacidade produtiva dos cultivos (MACHADO et al., 2012).

Numa consulta à bula de nematicidas registrados e liberados que podem ser utilizados na cultura da soja, pertencente à base de dados da Agência de Defesa Agropecuária do Paraná – ADAPAR (ADAPAR, 2021), agrupou 34 produtos comerciais classificados como nematicidas, dos quais oito são de origem química e 26 de origem biológica. Desses, apenas um ingrediente ativo (químico) pertence à classe toxicológica extremamente tóxico, quatro foram classificados como medianamente tóxico, 13 se enquadraram como pouco tóxico, seis foram classificados como improvável de causar dano agudo e oito produtos comerciais que foram classificados como inofensivos, ou seja, não apresentam toxicidade.

Outro destaque observado, na consulta realizada, diz respeito à composição de alguns nematicidas biológicos, por dois ou até três organismos antagonistas. Essa prática, pode ser compreendida como simulação do que pode ocorrer em ambientes naturais equilibrados, em que a presença de mais de um organismo antagonista do nematoide, pode contribuir decisivamente para a manutenção da população do fitoparasita sob controle (DIAS-ARIEIRA et al., 2018; SIDDIQUI; SHAUKAT, 2003)

Alguns estudos evidenciam a existência de fatores físico-químicos que podem influenciar a população de nematoides. Rodríguez-Kábana e Collins (1980), em estudo de longa duração em área de rotação com soja, milho, algodão e outros cultivos sobre a influência da adubação na população de *Pratylenchus scribneri*, observaram aumento na densidade de nematoides com a supressão da adubação fosfatada.

Barbosa et al. (2010) observaram, em condições controladas, que doses crescentes de K provocam efeitos negativos sobre parâmetros reprodutivos da população de *H. glycines*, tais como sobre o fator de reprodução, número de fêmeas por grama de raiz e ovos produzidos por fêmea. Os autores argumentam que o aumento nos teores de K, podem interferir na recepção do sinal pela membrana da célula da planta, tornando-as menos sensíveis resultando em menor número de sincícios.

Silva et al. (2017) realizaram um estudo em áreas de cultivo de cana-de-açúcar com populações mistas de *Meloidogyne* sp e *Pratylenchus* sp. Numa das áreas foi verificada a redução na população de *Pratylenchus* sp. com o aumento nos teores de P. Os autores destacaram que o aumento nos teores de P, pode induzir o aumento na síntese proteica, atividade celular e produção de peroxidases e polifenóis, tornando-as menos atraentes para o nematoide.

Com os avanços recentes, como o desenvolvimento da agricultura de precisão, que se baseiam na amostragem georreferenciada e a utilização de sistemas de informações geográficas, pode contribuir para identificação do padrão de distribuição espacial, bem como identificar fatores que atuam na disseminação de nematoides (FREITAS et al., 2019). Franchini et al. (2014b), utilizando técnicas de agricultura de precisão, estimaram a densidade de 82 indivíduos de *P. brachyurus* para causar a perda de produtividade correspondente a uma saca de soja ha⁻¹.

Matos et al. (2011), ao estudarem os efeitos da aplicação de vinhaça, observaram numa das áreas coeficientes de correlação significativo entre a densidade de *Pratylenchus* sp. observados e a matéria orgânica (-0,24) presentes no solo. Dentre outras correlações encontradas pelos autores para esse nematoide constatou-se os teores de P (-0,24) e H (0,14).

Ressalta-se que nem sempre os resultados apontam padrões entre os atributos do solo e a população de nematoides, embora possam ser encontrados correlações entre esses atributos com os danos provocados pelo nematoide, como ocorre com atributos que participam do complexo de acidez do solo, tais como o pH, Ca, Mg e Al (DEBIASI et al., 2011; MENDES et al., 2012; DEBIASI et al., 2014)

Nesse contexto, o manejo adequado de atributos químicos do solo pode ter papel importante, tendo em vista que, além de melhorar as condições de desenvolvimento e aumentar o potencial produtivo dos cultivos, pode contribuir positivamente para o manejo de *P. brachyurus*, pela redução dos seus danos na soja (DEBIASI et al., 2016b). A acidez do solo (pH), bem como os seus efeitos sobre a disponibilidade de Ca, Mg e sobre o teor de Al, contribui para aumentar a intensidade dos sintomas ocasionados à soja por *P. brachyurus* (DEBIASI et al., 2016b).

2.4 AGRICULTURA DE PRECISÃO E GEOESTATÍSTICA

A agricultura de precisão é um conjunto de tecnologias disponíveis que podem ser aplicadas para o manejo de solos, cultivos e insumos, que visa a detalhar melhor o gerenciamento do sistema de produção (INAMASU et al., 2011).

A amostragem georreferenciada de solo, com a introdução de grades amostrais, tem sido a ferramenta mais importante de agricultura de precisão utilizada para individualizar a variabilidade espacial dos atributos químicos do solo no Brasil (CHERUBIN et al., 2015). Dessa forma, a área do levantamento é dividida em células e dentro de cada uma delas, é realizada uma amostragem georreferenciada composta de subamostras.

Com o georreferenciamento dos dados, estes são processados com uso de conceitos estatísticos e de geoestatística para a geração de mapas (RESENDE et al., 2005), os quais podem ser úteis, como por exemplo, para nortear a calagem ou adubação. Esses procedimentos são capazes de identificar e corrigir as causas das variabilidades, com conseqüente uniformização da produtividade de cultivos ao longo das áreas mapeadas (LUCHIARI JUNIOR et al., 2011). Assim, o primeiro passo para o planejamento desses levantamentos consiste em determinar a densidade amostral, que reflete no tamanho da grade (MOLIN et al., 2015).

Nesse sentido, Nanni et al. (2011), relataram que a densidade amostral de uma amostra ha^{-1} , pode ser suficiente para o mapeamento de alguns atributos de solo do conjunto de dados em estudo, porém, não foi satisfatória para capturar a variabilidade espacial, dos níveis de fósforo, potássio e saturação por bases. Por outro lado, Cherubin et al. (2015), objetivando definir o tamanho ideal das grades amostrais, constataram que existe a necessidade de coletar pelo menos uma amostra ha^{-1} , para descrever adequadamente a variabilidade espacial dos atributos fósforo e potássio em áreas monitoradas utilizando técnicas de agricultura de precisão.

Molin et al. (2015), relatam que nos Estados Unidos e em alguns países da Europa, as grades são normalmente mais densas que as utilizadas no Brasil, onde comumente são adotadas grades amostrais entre 3,0 e 5,0 hectares, justificada basicamente pela maior extensão dessas áreas. Os autores comentam que a definição da densidade da grade é um tema controverso entre acadêmicos e práticos, devido à viabilidade econômica e operacional, mas salientam que a referência aceita

pela comunidade acadêmica parte da dimensão mínima da grade amostral entre 0,5 e 2,0 amostras ha^{-1} .

A dimensão da grade amostral é determinante para o mapeamento da variabilidade espacial dos atributos do solo, porque o distanciamento demasiado pode comprometer a realização da análise geoestatística, devido à independência entre as amostras (MOLIN et al., 2015).

O conceito da geoestatística, que leva em conta a localização geográfica e a dependência espacial geológica, surgiu na África do Sul a partir de estudo com dados de concentração de ouro, em que Krige (1951), para explicar a existência de locais com maior e menor concentração do mineral, observou que seria necessário levar em conta as distâncias entre as amostras para encontrar sentido nas variâncias em estudo.

Matheron (1971), introduziu o conceito de variáveis aleatórias que se associam às localizações no espaço. De acordo com o autor, matematicamente, a variável regionalizada é uma função $f(x)$ no ponto x , composto por um aspecto aleatório, com irregularidades e variações ao acaso entre dois pontos, e um aspecto estruturado ou de continuidade, que deve refletir em algum nível as características estruturais do fenômeno regionalizado, que pode ser estimada pela construção do semivariograma (Figura 1).

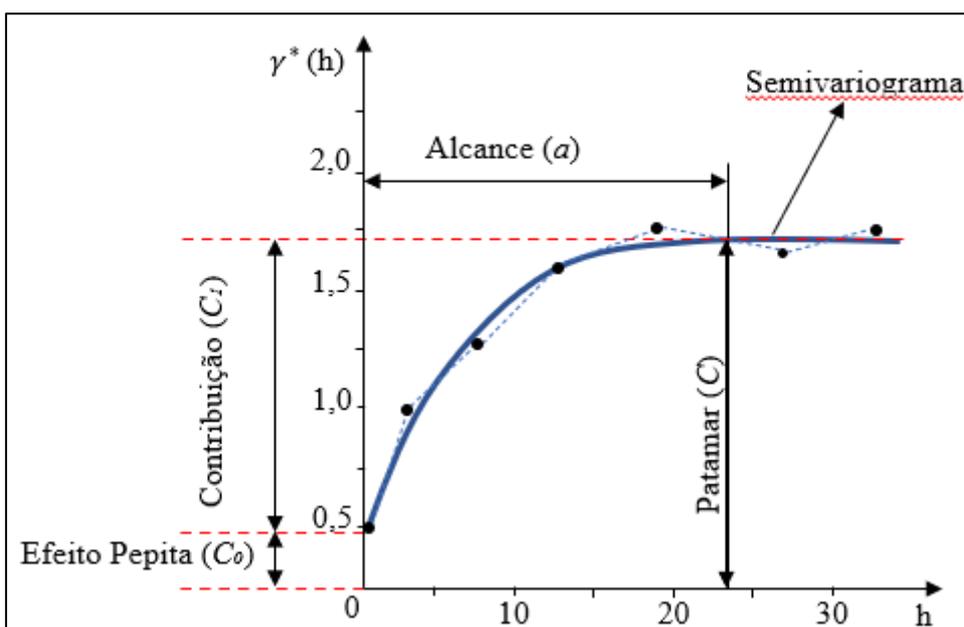


Figura 1. Exemplo teórico de um semivariograma, com seus respectivos parâmetros (Adaptado de CAMARGO, 1998).

O semivariograma, é uma das ferramentas mais importantes da geoestatística. Grego et al. (2014), denominam o semivariograma como um “medidor” do grau de semelhança entre vizinhos, que pode ser estimado pela Equação 1:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad \text{Eq. 1}$$

em que, $N(h)$ é o número de pares de valores medidos $Z(x_i)$, $Z(x_i+h)$, separados por um vetor h .

A dependência espacial se configura quando o semivariograma apresenta um comportamento crescente de acordo com o aumento da distância, que se estende até a estabilização no valor da variância dos dados (GREGO et al., 2014).

O ajuste do modelo ao semivariograma depende dos parâmetros efeito pepita (C_0), alcance, patamar (C) e a variância estrutural (C_1). O parâmetro efeito pepita representa a descontinuidade do fenômeno para distâncias inferiores a menor distância entre os pontos amostrais (VIEIRA, 2000), incluindo o erro experimental. Esse parâmetro pode ser interpretado como a variabilidade devido ao acaso (SEIDEL; OLIVEIRA, 2013).

Segundo Vieira (2000), o alcance representa a distância dentro do espaço amostral em que os pontos amostrais se correlacionam entre si, ou seja, é a distância limite de dependência espacial. O autor ressalta que dentro do limite do alcance, devido à correlação existente entre as amostras, permite-se a confecção de mapas por meio de interpolações. No entanto, o autor ressalta que, para distâncias superiores ao alcance, a aplicação da geoestatística é inviável, devendo ser aplicados procedimentos baseados na estatística clássica.

O patamar ($C_0 + C_1$) é a soma da variância estrutural (contribuição), com o efeito pepita, o qual representa o valor da semivariância a partir do alcance e que se aproxima da variância dos dados, se ela existir.

O ajuste de um modelo teórico ao semivariograma experimental é um dos aspectos mais importantes das aplicações da geoestatística. Alguns dos modelos mais utilizados são os modelos exponencial, esférico e gaussiano (Figura 2), os quais apresentam comportamentos distintos.

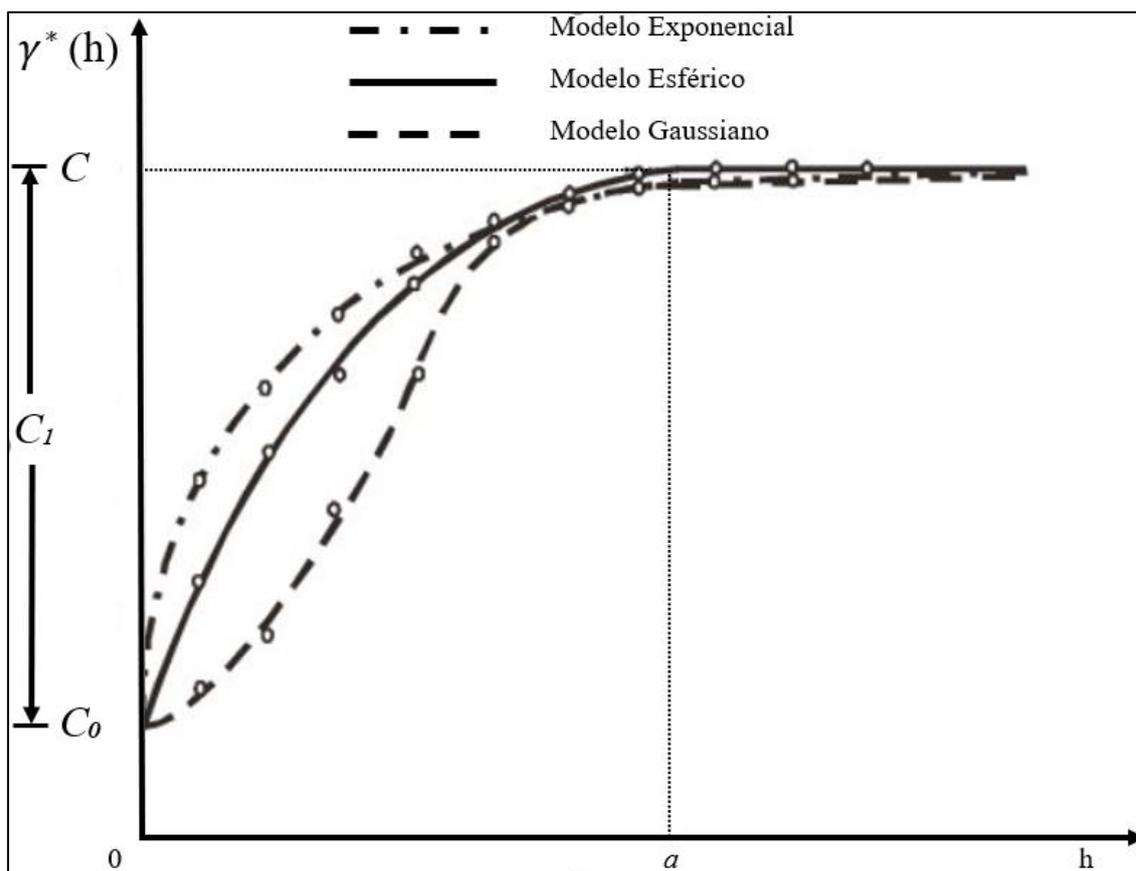


Figura 2. Representação gráfica dos modelos experimentais exponencial, gaussiano e esférico (Adaptado de GREGO et al., 2014).

Grego et al. (2014), afirmam que o modelo exponencial, definido pela Equação 2, é o que representa a maior perda de semelhança com o aumento da distância. Os autores relatam que, normalmente, dados de precipitação pluviométrica são ajustados por este modelo.

$$\gamma(h) = C_0 + C_1[1 - e^{-3(h/a)}] \quad h \neq 0 \quad \text{Eq. 2}$$

sendo que, $\gamma(h)$ é o valor da semivariância para o modelo; C_0 é o efeito pepita; C_1 contribuição ou variância estrutural; h são os valores de distâncias; e, a é o alcance.

Dentre os principais modelos de ajuste do semivariograma, o modelo gaussiano (Equação 3) representa os processos de maior continuidade, com um crescimento lento na origem e um ponto de inflexão próximo ao alcance (GREGO et al., 2014).

$$\gamma(h) = C_0 + C_1[1 - e^{-3(h/a)^2}] \quad h \neq 0 \quad \text{Eq. 3}$$

O modelo esférico é o que mais ocorre em estudos que envolvem atributos químicos do solo (SOUZA et al., 2010). Dentre as características deste modelo (Equação 4), observa-se um comportamento linear em sua origem e que sua tangente, atinge o patamar a dois terços do alcance (VIEIRA, 2000).

$$\begin{aligned} \gamma(h) &= C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] & 0 < h < a \\ \gamma(h) &= C_0 + C_1 & h > a \end{aligned} \quad \text{Eq. 4}$$

Diggle e Ribeiro (2007), relatam a demanda por modelos cuja estrutura de correlação teórica entre $S(x)$ e $S(x')$ diminua ao passo que a distância $h = \|x - x'\|$ aumente. Os autores justificam a importância das funções de correlação dos modelos da família *Matérn* (Equação 5), por atender a esses dois requisitos, uma vez que são constituídos por dois parâmetros, ϕ e κ .

$$\rho(h) = \{2^{\kappa-1} \Gamma(\kappa)\}^{-1} (h/\phi)^\kappa K_\kappa(h/\phi) \quad h > 0 \quad \text{Eq. 5}$$

em que, $\rho(h)$ se refere a correlação entre pares de pontos amostrais separados pela distância h ; κ é o parâmetro que determina a suavidade do processo $S(x)$; $\Gamma(\kappa)$ é a função Gama; ϕ é o parâmetro de alcance do modelo; e, K_κ denota a função modificada de Bessel de ordem κ .

O modelo *Matérn* (Equação 5) tem sido referido na geoestatística como *K-Bessel*, uma vez que o resultado é dependente do valor assumido pelo parâmetro K_κ (WALLER; GOTWAY, 2004). Essa renomeação se deve à formalização inicial desse grupo de modelos por Matérn (1960).

Após a geração dos modelos, deve ser observado o ajuste de modelo ao semivariograma. Isso se deve ao fato de que os cálculos geoestatísticos dependem do ajuste do modelo do semivariograma para cada distância especificada (GREGO et al., 2014). Dessa forma, o ajuste da função semivariograma é o aspecto mais importante da geoestatística, e, por essa razão, o modelo escolhido deve ser validado.

Grego et al. (2014), citam alguns coeficientes que podem auxiliar na validação do modelo e dos parâmetros para o ajuste do semivariograma, tais como o coeficiente de correlação, a raiz quadrada do erro médio e o índice de Akaike.

Vieira et al. (2010), utilizaram a ferramenta de validação cruzada, conhecida como “jack-knifing”, para realizar essa tarefa. Os autores relatam que, nesse método, um valor é retirado temporariamente do conjunto de dados, sendo este estimado pelo modelo de semivariograma em avaliação, com repetição do processo, sucessivamente, até que todos os valores amostrais sejam estimados. Ao final do processo, os autores apontam, ainda, que é possível calcular parâmetros de erro, tal como o média (μ_{jk}) e a variância (σ_{jk}) do erro reduzido, que tem como parâmetros ideais de interpretação 0 (zero) e 1 (um), respectivamente.

A interpolação consiste na estimativa de valores de uma variável para os pontos não amostrados de um ambiente de estudo. Existem diferentes técnicas de interpolação, pode-se citar o inverso da distância e a krigagem (VIEIRA, 2000; SILVA et al., 2008).

O inverso do quadrado da distância se enquadra na abordagem de modelos determinísticos locais, em que cada ponto é estimado a partir das amostras vizinhas. A interpolação realizada pela adoção deste método, pode apresentar resultados satisfatórios em estudos relacionados com atributos químicos de solo comparados aos obtidos pelo método de krigagem (SILVA et al., 2008).

Diferente das bases que norteiam a interpolação pelo método inverso do quadrado da distância, na krigagem são determinados pesos para as amostras, baseadas nos parâmetros do semivariograma experimental, geradas com a análise geoestatística. Embora envolva teoria e conceitos mais complexos, a krigagem é capaz de proporcionar uma descrição mais acurada da estrutura espacial dos dados, por meio da dependência espacial dos dados, além de revelar informações sobre a distribuição da estimativa do erro e a variância estimada pelo modelo (SILVA et al., 2008).

Yamamoto (2020), relata que dentre as diversas formas de krigagem, a conhecida como krigagem ordinária tem sido o padrão utilizado em aplicações destinadas à atividade de mineração, bem como em mapeamentos utilizados na agricultura. O autor complementa que a krigagem ordinária é o resultado da krigagem simples, que se desenvolve sob a hipótese de média constante no espaço amostral, porém considera também a média local de uma dada vizinhança, que é calculada pela krigagem média.

A utilização de ferramentas de geoestatística, como a krigagem ordinária, pode contribuir de forma substancial para a elaboração de mapas de variabilidade de

atributos do solo (NANNI et al., 2011; CHERUBIN et al., 2015), que posteriormente podem ser utilizadas para aplicação em taxa variável de fertilizantes e corretivos, resultando no uso racional de insumos (RESENDE et al., 2005; LUCHIARI JUNIOR et al., 2011).

A adoção da geoestatística, por meio do seu arcabouço teórico, permite amparar tomadas de decisões referentes ao sistema de manejo, que minimizem seus efeitos ambientais e com resultados compatíveis para a produtividade das diferentes culturas (GREGO et al., 2014).

2.5 DESCOBERTA DE CONHECIMENTO EM BANCO DE DADOS (KDD)

Com o grande avanço tecnológico para a coleta e armazenamento de dados pelas grandes corporações, a extração de informações de importância se tornou uma tarefa desafiadora para estatísticos e analistas de dados. Isso se deve à natureza dos dados armazenados e abordagens que não atendem a pressupostos para a aplicação da estatística tradicional (TAN et al., 2009).

Diante dessas demandas iniciou-se o desenvolvimento de técnicas de análise de dados, gerando informações capazes de se transformar em conhecimento útil. Essas técnicas, delineadas numa sequência organizada é denominada de descoberta de conhecimento em base de dados, ou, *Knowledge Discovery in Databases* - KDD (FAYYAD et al., 1996).

A descoberta de conhecimento em base de dados é um processo iterativo, que envolve várias tomadas de decisão ao longo das etapas de construção do conhecimento (FAYYAD et al., 1996). Essas etapas que compõem o processo (Figura 3) são:

- i. Pré-processamento: Diz respeito à definição dos dados do conjunto que são considerados de interesse para o processo (GOLDSCHMIDT et al., 2015). Compõem essa etapa a seleção de dados de interesse, direta ou indireta, discretização, limpeza, dentre outros;
- ii. Transformação de dados: Envolve a realização de tratamentos que contribuam para a qualidade dos dados, por exemplo, a agregação e a normalização;
- iii. A mineração de dados: Nessa etapa ocorre a aplicação de algoritmos em busca por padrões de interesse. A forma representacional pode ser

específica ou um conjunto representações: regras ou árvores de classificação, regressão, agrupamento e assim por diante (FAYYAD et al., 1996).

- iv. Avaliação e interpretação: etapa na qual é realizada a avaliação dos padrões obtidos e apresentação de conhecimento.

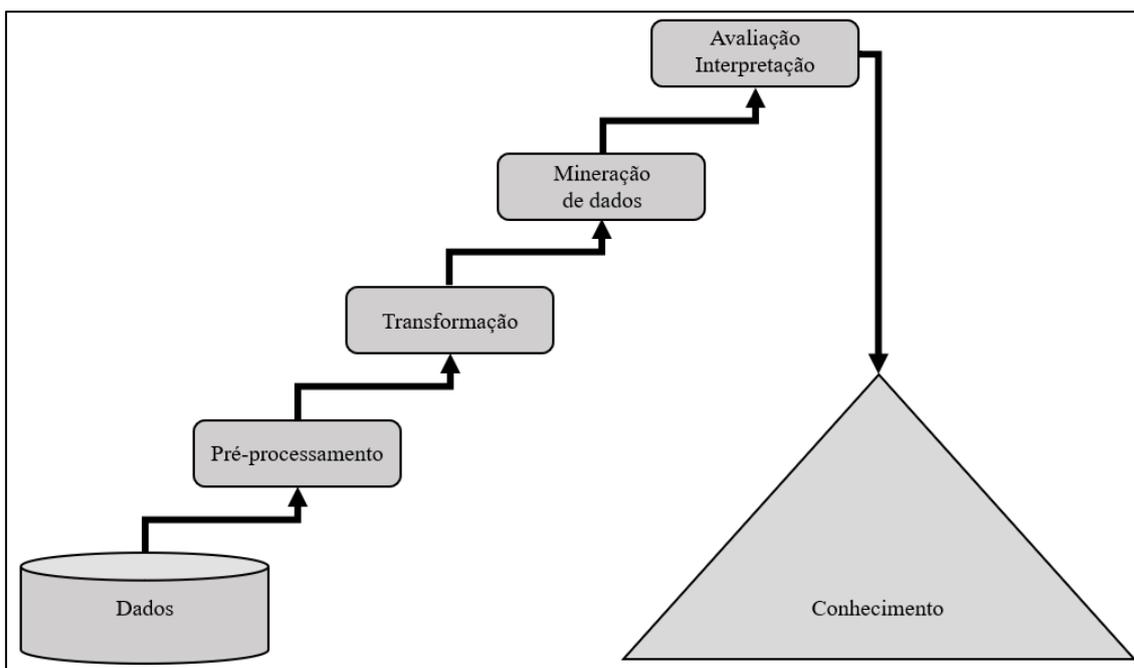


Figura 3. Etapas do processo de descoberta de conhecimento em base de dados (Adaptado de FAYYAD et al., 1996).

Mucherino et al. (2009) descrevem que a adoção das técnicas de descoberta de conhecimento em base de dados é uma área de pesquisa relativamente nova no campo agropecuário. Os autores ressaltam a existência crescente de aplicações dessas técnicas que podem ser utilizadas nesse campo, e que representa potencial de uso no futuro, dentre os mais promissores, estão as aplicações dessas técnicas em trabalhos de classificação de solos, análise de cultivos e previsões climáticas.

Algumas tarefas envolvidas na descoberta de conhecimento são o agrupamento, regras de associação, regressão e classificação. As tarefas de agrupamento, também chamada de clusterização, tem como objetivo separar registros de um conjunto de dados em subconjuntos (GOLDSCHMIDT et al., 2015). Essa tarefa pode gerar um produto, baseado no objetivo inicial, ou mesmo constar como subetapa para a realização de outra tarefa ao longo do processo de descoberta de conhecimento.

Os dois principais tipos de tarefas para predição são a regressão e a classificação. Na regressão, buscam-se funções lineares ou não, sendo que a variável a ser predita consiste em atributos numéricos presentes em banco de dados com valores reais, ou seja, restrito aos atributos contínuos (GOLDSCHMIDT et al., 2015).

Guimarães et al. (2015) utilizaram a tarefa de regressão para determinar qual dos componentes da CTC efetiva do solo mais se correlaciona para definição da dose de gesso agrícola, em três áreas de cultivo de Ponta Grossa/PR. Os modelos gerados indicaram que a saturação por cálcio foi mais importante que a saturação por alumínio para estimar a necessidade de gesso agrícola.

Kandel et al. (2018) analisaram atributos químicos e físicos e suas relações com a população de *Pratylenchus* spp. com o uso da árvore de decisão, sendo que o teor de carbono, condutividade elétrica aparente e a irradiação global foram identificados como os atributos com as relações mais importantes estabelecidas com a densidade dos nematoides.

A classificação consiste na predição de uma variável categórica, chamada de atributo classe, em que se busca um modelo que mapeie um conjunto de registros em um conjunto de variáveis predefinidas. Meira et al. (2008), utilizaram a tarefa de classificação para modelar a epidemia de ferrugem do cafeeiro. Os autores determinaram como fator principal, a temperatura durante o período de molhamento, que determina a germinação e penetração do agente etiológico da ferrugem.

Souza et al. (2010) demonstraram a influência da altitude no nível de produtividade da cana-de-açúcar de Catanduva/SP utilizando a tarefa de classificação. Para isso, os autores utilizaram o método de árvores de decisão como algoritmo de execução.

Alguns dos principais métodos utilizados para a mineração de dados são baseados na construção de árvores de decisão. Dentre as características do método, árvore de decisão é uma ferramenta estatística robusta para identificar padrões e relacionamentos significativos, bem como para explorar a estrutura não revelada nos dados (KANDEL et al., 2018).

De forma básica, a indução da árvore de decisão inicia-se com um conjunto de treinamento, que são particionados repetidamente, ao passo que os atributos independentes passam por testes, resultando em subconjuntos mais homogêneos em relação ao atributo dependente (SOUZA et al., 2010).

Tecnicamente, uma árvore de decisão é constituída de uma cadeia de nós de decisão, que se inicia pelo nó raiz, atributo de menor entropia, que se conecta a outros nós por ramificações e se estende até os nós folha, onde termina a árvore, conforme representado na Figura 4. As partições são baseadas em conceitos de razão de ganho de informação e redução de entropia (QUINLAN, 1993).

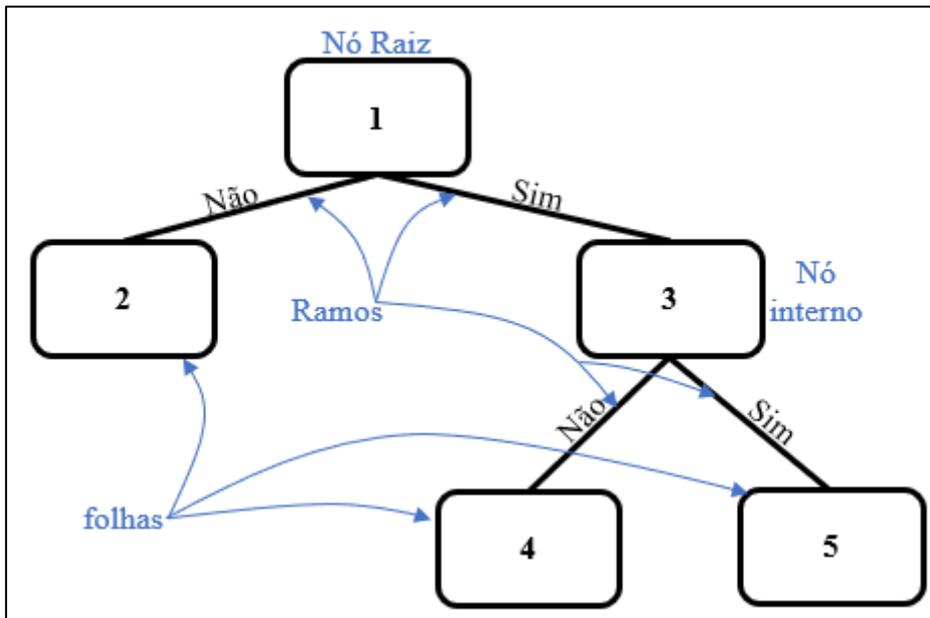


Figura 4. Estrutura básica de uma árvore de decisão, com os nós de decisão (nó raiz e nó interno), ramos e folhas (Adaptado de TAN et al., 2009).

Goldschmidt et al. (2015) descrevem a entropia, valor entre 0 e 1, em que, caso todos os registros pertençam a uma mesma classe, remete ao valor 0, ao passo que, quando todos os valores pertençam a classes diferentes, a entropia resultante terá o valor 1. O grau de entropia é definido pela Equação 6.

$$H(T) = \sum_{j=1}^k \frac{freq(c_j, T)}{|T|} * \log_2 \frac{freq(c_j, T)}{|T|} \quad \text{Eq. 6}$$

sendo que, $H(T)$, representa a entropia de T ; T diz respeito ao conjunto de registros de entrada; $freq(c_j, T)$ corresponde a quantidade de registros da classe c_j em T ; $|T|$ representa o número total de registros do conjunto T ; e, k indica o número de classes distintas que ocorrem nos registros de T .

Dentre os algoritmos de indução de árvores de decisão, alguns são mais conhecidos, como o CART, ID3 e C4.5. No entanto, o algoritmo C4.5, evolução do algoritmo ID3, é o algoritmo mais utilizado na literatura, devido aos ótimos resultados que proporciona em problemas de classificação (BASGALUPP, 2010).

Segundo Basgalupp (2010), a maioria dos algoritmos de indução de árvores de decisão se desenvolve executando funções de divisão, em que cada nó interno da árvore é dividido a partir de um único atributo, bem como, minimizando o grau de impureza contido nos nós internos. O autor afirma que na métrica do ganho de informação (Equação 7), uma medida que se baseia na impureza, a determinação de uma condição de teste, provém da comparação do grau de entropia do nó pai com os nós filhos gerados.

$$Ganho = entropia(pai) - \sum_{j=1}^n \frac{N(v_j)}{N} entropia(v_j) \quad \text{Eq. 7}$$

em que, n é o número de nós filho; N é o número total de exemplos do nó pai; e, $N(v_j)$ é o número de exemplos associados ao nó filho.

Outra métrica, o *gain ratio*, foi criada para reduzir problemas, tal como um atributo com um único exemplo configura uma classe, ou seja, de entropia 0, conseqüentemente, de ganho máximo (BASGALUPP, 2010). O *gain ratio*, denota o ganho de informação relativo, definido pela Equação 8.

$$GainRatio = \frac{ganho}{entropia(t)} \quad \text{Eq. 8}$$

Com a execução do *gain ratio*, o problema relatado anteriormente é solucionado, uma vez que não é calculado quando a entropia é zero, mas possibilita a execução para atributos com baixa entropia.

Goldschmidt et al. (2015) ressaltam que o processo de avaliação de pontos de separação depende do domínio de cada atributo, categórico ou numérico. Para atributos categóricos, os autores relatam que a avaliação dos pontos de separação se baseia em testes sobre cada atributo individualmente. No entanto, para atributos numéricos, o processo se inicia pela ordenação dos valores do atributo e a separação

do conjunto entre v_i e v_{i+1} . Nesse ponto é calculado o ganho de informação e a respectiva divisão pela entropia, *gain ratio*. Após avaliar todas as separações possíveis, será selecionada a que fornece o maior ganho.

Com a construção da árvore de decisão, é comum observar elevadas taxas de erros causadas por árvores de decisão muito pequenas, *underfitting* de modelo, ocorrendo melhoria nessas taxas com o aumento do número de nós dessa árvore, até que as taxas de erros voltem a se elevar, por conta do tamanho excessivamente grande da nova árvore, *overfitting* do modelo (TAN et al., 2009). Esse tipo de problema pode ser minimizado pelo método de seleção de atributos e o método de poda ao qual o conjunto de dados é submetido.

A poda de uma árvore de decisão pode ser realizada de duas formas, como pré-poda ou pós-poda. A pré-poda, é realizada com a inclusão de algum critério de parada durante o processo de construção da árvore. Quando se adota a pós-poda, após a geração completa da árvore de decisão, é incluído algum critério, que transforma um (ou mais) nó interno em nó folha. Se a realização da poda proporcionar melhora nos parâmetros de avaliação da árvore de decisão, a árvore é podada, caso contrário não ocorre a poda (BASGALUPP, 2010).

A avaliação é importante porque norteia, a condução do processo de descoberta de conhecimento, além de mensurar a qualidade da árvore de decisão. Dentre os métodos de avaliação, Tan et al. (2009) destacam os métodos *hold-out*, sub-amostragem aleatória, validação cruzada e *bootstrap*, para a avaliação do desempenho de classificadores. Dentre eles, alguns se sobressaem pela simplicidade, característica do método *hold-out*, ou pela adaptabilidade à dimensão do conjunto de dados, tal como ocorre com a validação cruzada com k partições, que se adapta a conjunto de dados relativamente pequenos (BASGALUPP, 2010).

No método *hold-out*, o conjunto de dados é subdividido em dados de treinamento e de teste (por exemplo: 50-50%, ou 66,67-33,33% para treinamento e teste). Na validação cruzada com k partições, o conjunto de dados é subdividido em k partes iguais. O teste é realizado k vezes, das quais em cada execução, uma das partes será utilizada como conjunto teste, enquanto o restante do conjunto é utilizado como conjunto de treinamento (TAN et al., 2009).

Além do método de avaliação, existem diversas medidas de avaliação da modelagem preditiva. Essas medidas são baseadas na geração da matriz de confusão (Tabela 1), que é resultado dos exemplos reais e a prevista pelo classificador.

Tabela 1. Exemplo de matriz de confusão para problemas de duas classes (ROKACH; MAIMON, 2014)

	Predição positiva	Predição negativa
Exemplos positivos	VP	FN
Exemplos negativos	FP	VN

Para a avaliação da classificação composto por duas classes, uma é considerada positiva e a outra negativa. Os conceitos são descritos como segue (ROKACH; MAIMON, 2014):

- i. Verdadeiros Positivos (VP): número de exemplos positivos, que foram classificados como positivos pelo classificador.
- ii. Falsos Positivos (FP): número de exemplos negativos, que foram identificados erroneamente como positivo pelo classificador.
- iii. Falsos Negativos (FN): número de exemplos positivos, que foram classificados erroneamente como negativos.
- iv. Verdadeiros Negativos (VN): número de exemplos negativos, que foram classificados como negativos.

Com base nos resultados exibidos na matriz de confusão, dos valores de VP, FP, VN e FN, é possível calcular algumas medidas de avaliação do classificador, tais como a acurácia, taxa de erro, precisão, *recall* e especificidade (ROKACH; MAIMON, 2014).

Acurácia: estimativa de acertos nas predições do classificador, que é definida pela Equação 9.

$$Acurácia = \frac{(VP+VN)}{(VP+VN+FP+FN)} \quad \text{Eq. 9}$$

Taxa de erro: é uma medida que complementa a estimativa fornecida pela acurácia, uma vez que a soma da taxa de erro e da acurácia é igual a um (1), que é definida pela Equação 10.

$$Erro = \frac{(FP+FN)}{(VP+VN+FP+FN)} \quad \text{Eq. 10}$$

Precisão: medida de desempenho que estima o número de predito de positivos que realmente pertence à classe positiva (Equação 11).

$$\textit{Precisão} = \frac{(VP)}{(VP+FP)} \quad \text{Eq. 11}$$

Recall: esta medida também conhecida como sensibilidade, estima a eficiência do classificador utilizado para os exemplos positivos, ou seja, determina quão bem um classificador identifica positivos cujas classes realmente são positivas, conforme a Equação 12.

$$\textit{Recall} = \frac{(VP)}{(VP+FN)} \quad \text{Eq. 12}$$

Especificidade: a medida especificidade, Equação 13, estima a eficiência da classificação de negativos que realmente pertencem a classe negativa.

$$\textit{Especificidade} = \frac{(VN)}{(VN+FP)} \quad \text{Eq. 13}$$

Estas duas últimas medidas de avaliação, se tornam importantes, uma vez que, embora as estimativas como acurácia e a taxa de erro sejam amplamente utilizadas para avaliar o desempenho de classificadores, em algumas situações, essas métricas podem não ser suficientes para realizar tal avaliação, tal como quando há desbalanceamentos entre classes (ROKACH; MAIMON, 2014).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO

O município de Mundo Novo, localizado no extremo sul da região Cone Sul do Estado de Mato Grosso do Sul, Brasil, sob as coordenadas 23°56'17"S e 54°16'15"W, com altitude de 324 m (Figura 5). A cobertura vegetal predominante na região é a pastagem cultivada, ocorrendo em menores proporções lavouras anuais, mandiocultura, várzeas e fragmentos de floresta estacional aluvial, enquanto os solos do município apresentam, de forma predominante, a ocorrência de argissolos de textura arenosa/média e média/argilosa, gleissolos e organossolos (MATO GROSSO DO SUL, 2011).

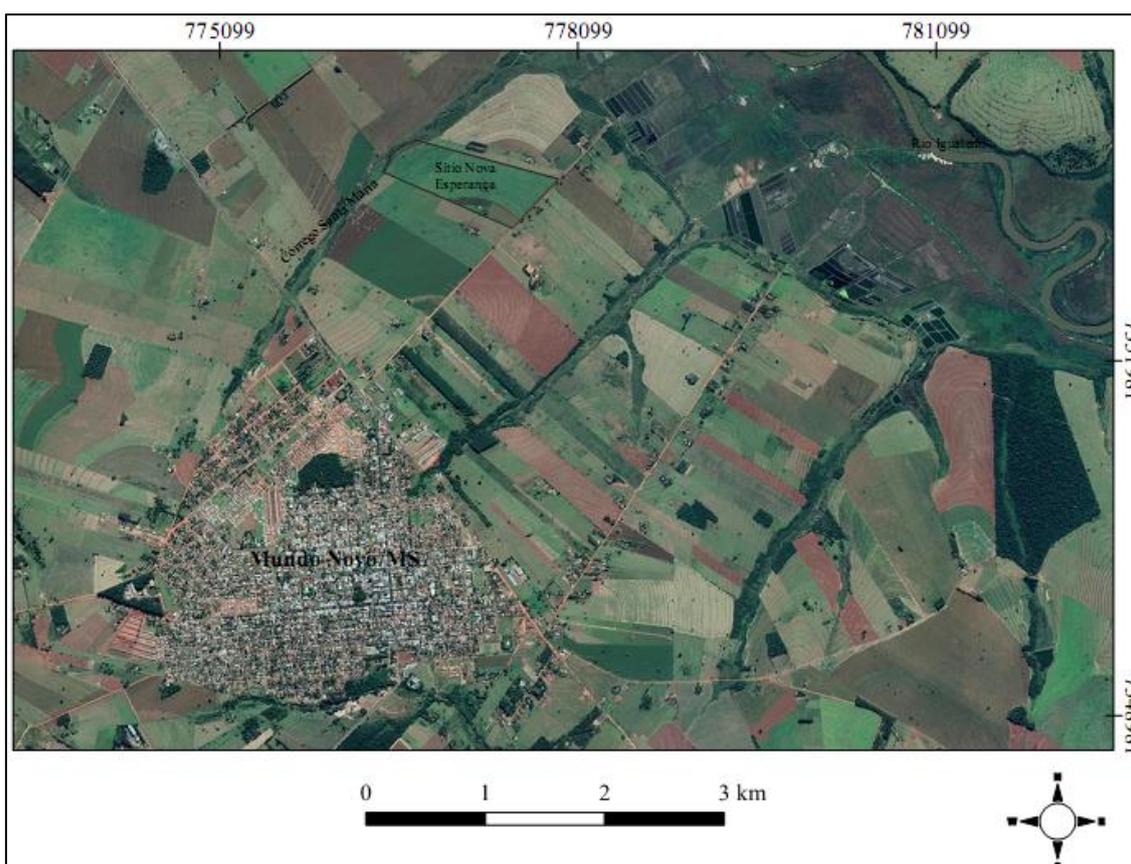


Figura 5. Mundo Novo/MS e o Sítio Nova Esperança. (Fonte: NEXTGIS, 2018).

Segundo a classificação de Köppen, o clima predominante é o Cfa, que é caracterizado pela ocorrência de clima subtropical, denominado clima temperado

úmido com verão quente (ALVARES et al., 2014). Os dados referentes às condições climáticas durante o período de condução do estudo, de outubro de 2018 a janeiro de 2019, foram agrupados e apresentados por períodos decendiais (Figura 6), com informações de precipitação pluviométrica (mm), bem como temperaturas mínimas e máximas (°C).

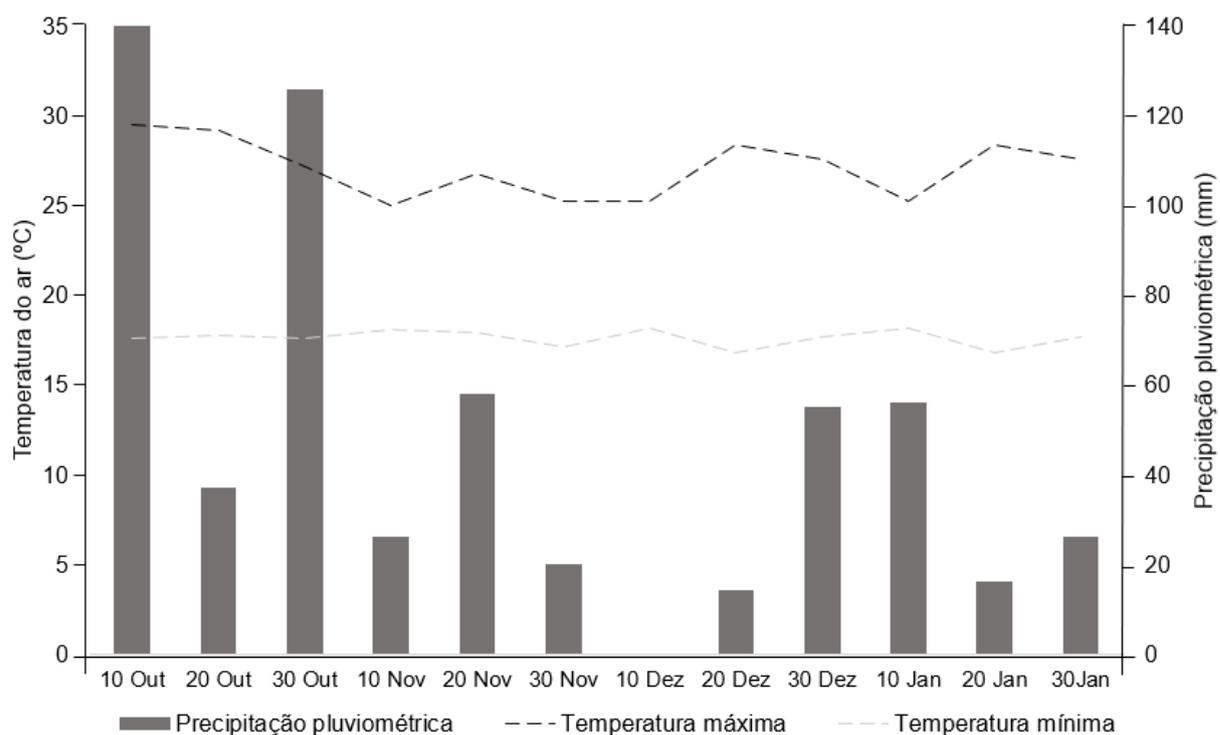


Figura 6. Dados de temperatura mínima e máxima e precipitação pluviométrica, de Mundo Novo/MS de outubro a janeiro, safra 2018/19 (Fonte: Copagril).

3.2 LOCAL DO ESTUDO

O estudo foi realizado no sítio Nova Esperança (Figura 5), com área de 52,60 hectares, sob as coordenadas 23°54'31"S e 54°16'34"W, com altitude de 276 m. Na propriedade as experiências anteriores, remetem a exploração da pecuária leiteira, silvicultura e, integrado à reforma de pastagens, cultivos esporádicos de milho (SILVEIRA et al., 2020). A exploração intensiva da área, com a introdução de cultivos anuais foi iniciada em 2011, quando se iniciou o cultivo de soja e milho, com eventual ocupação de parte da área com aveia-preta (*Avena strigosa*) e braquiária ruzizensis (*Urochloa ruzizensis*).

Para compor a área de estudo, foi delimitado um talhão, com área de 21,50 ha (Figura 7), que vem sendo explorado desde 2015 com soja e milho, cultivados em sucessão. Nessa área, o solo é classificado como Argissolo Vermelho distrófico (AVd), de acordo com os parâmetros descritos por Santos et al. (2018). Outras características identificadas, foram a textura arenosa, com solo muito profundo e a declividade variando de plano a suave (LEPSCH et al., 2015).

A semeadura da soja foi realizada no dia 06/10/2018, emergência no dia 11/10/2018. A cultivar utilizada foi a Monsoy 6410 ipro, de ciclo precoce e hábito de crescimento indeterminado. As sementes foram previamente tratadas com o produto comercial Standak Top® (Tiofanato metílico: 225 g L⁻¹, Fipronil: 250 g L⁻¹ e Piraclostrobina: 25 g L⁻¹), com dose de 2 ml Kg⁻¹ de sementes. Antes da semeadura, as sementes foram inoculadas com *Bradyrhizobium japonicum* (estirpes SEMIA 5079 e SEMIA 5080), utilizando 2,5 ml kg⁻¹ de sementes do produto comercial Grap Nod L+®, uniformizadas com uso de betoneira. O espaçamento utilizado foi de 0,45 m nas entrelinhas e 12 sementes por metro linear. A adubação de base foi realizada com aplicação de 250 kg ha⁻¹ do formulado 00-18-08, no momento da semeadura, com cobertura de cloreto de potássio de 80 kg ha⁻¹, aos sessenta dias após a semeadura, no estágio R5,1 da cultura.

3.3 AMOSTRAGEM

A demarcação dos pontos de amostragens, foi definida a partir da criação de uma grade amostral, com espaçamento de 60 X 60 metros, totalizando 60 pontos amostrais (Figura 7). Para isso, foi utilizado o *software* QGIS versão 3.4, com a utilização do complemento *Feature Grid Creator*, e uso de GPS para a demarcação no campo.

A amostragem de solo foi realizada em 01/12/2018, com a cultura no estágio R4, considerando o raio de 10 m no entorno do ponto amostral. Dessa forma, para as análises química e textura de solo, utilizou-se amostras compostas por 5 subamostras, na profundidade de 0-20cm, que foram coletadas nas entrelinhas do cultivo. Para a amostragem destinada quantificação de nematoides, cada amostra foi composta por 15 raízes de plantas de soja, em que foram descartadas a parte aérea, com aproximadamente 500 gramas de solo, composto de solo que se encontrava aderida nas amostras de raízes.

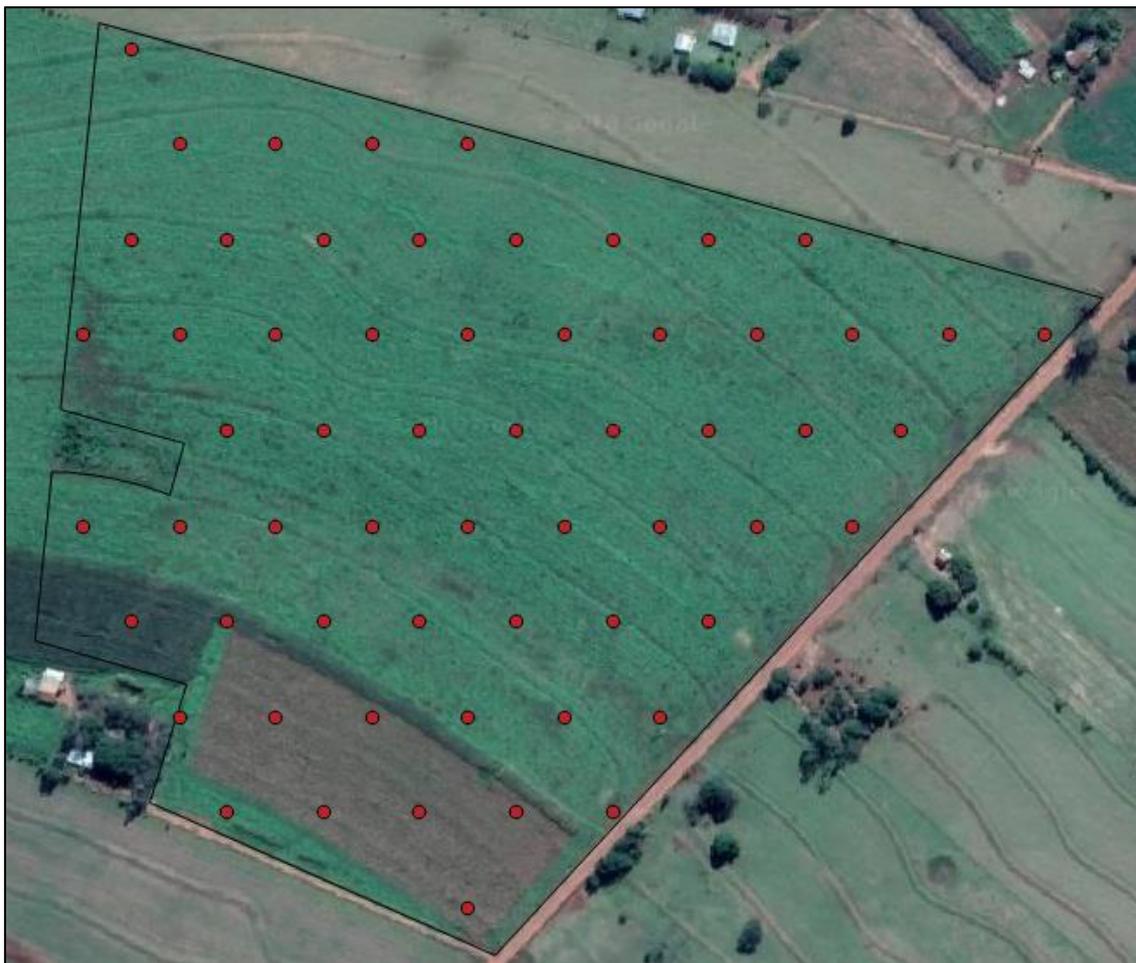


Figura 7. Contorno do talhão de estudo e representação da grade amostral (Fonte: NEXTGIS, 2018).

As amostras de solo foram acondicionadas em embalagens plásticas, devidamente identificadas e encaminhadas para laboratório (Nutrisolo, Ivinhema/MS). A obtenção dos valores atribuídos aos resultados se deu a partir da utilização dos seguintes extratores: Cloreto de cálcio (pH), Mehlich I (P e K), Cloreto de cálcio 1 mol L⁻¹ (Ca, Mg e Al) e a granulometria, que determinou os teores de areia, silte e argila, pelo método do densímetro (EMBRAPA, 1997).

As amostras nematológicas, foram processadas no Laboratório de Química da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, unidade universitária de Mundo Novo/MS, onde as amostras foram conservadas por dois dias em refrigerador ($\pm 8^{\circ}\text{C}$). Antes do processamento, cada amostra foi reduzida para 10g de raízes. A extração de *P. brachyurus* foi realizada com uso de liquidificador, acrescidas de 250 ml de água e trituradas por 30 segundos. A suspensão foi vertida em uma peneira de 0,250 mm

de abertura sobreposta a uma de 0,025 mm, que foram transferidos para tubos tipo Falcon de 50 ml, com auxílio de pissete com água. Posteriormente, as amostras foram centrifugadas em solução de sacarose, de acordo com a metodologia de Coolen e D'Herde (1972).

Após a extração, as amostras de raiz e solo foram armazenadas em geladeira ($\pm 8^\circ \text{C}$) para posterior contagem da espécie de nematoide. A contagem de *P. brachyurus* presentes nas amostras foi realizada utilizando câmara de Peters, com o auxílio de um microscópio óptico.

3.4 ANÁLISE DESCRITIVA

Inicialmente, foi realizada a análise exploratória com os dados, em que foram considerados os atributos pH CaCl_2 , fósforo (P), em mg dm^{-3} ; potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), a capacidade de troca catiônica efetiva (CTC), em cmolc dm^{-3} ; a saturação por bases (V), teor de areia, silte e argila, em percentagem (%), além do número de *P. brachyurus* observados nas amostras de raízes de soja, resultante das análises laboratoriais. Para isso foi utilizado o programa R 4.0.2 (R Core Team, 2016) e o pacote *fbasics* da biblioteca do R (WUERTZ et al., 2017).

Foram identificadas as medidas de posição, valores mínimos, máximos, média, mediana. Além disso, foram determinadas as medidas de dispersão, coeficiente de variação (CV), coeficiente de assimetria (Cs), coeficiente de curtose (Ck), bem como a normalidade, pelo teste de *Kolmogorov-Smirnov*.

Os valores de CV, foram interpretados com base em Warrick e Nielsen (1980), sendo considerado baixo ($\text{CV} \leq 12\%$), médio ($12 < \text{CV} \leq 60\%$) e alto ($\text{CV} > 60\%$).

3.5 ANÁLISE GEOESTATÍSTICA

Na análise geoestatística foi verificada a existência de dependência espacial, dos atributos físico-químicos e de *P. brachyurus*, a partir do ajuste de modelos teóricos aos semivariogramas isotrópicos. Os modelos de semivariogramas teóricos foram ajustados usando o método dos mínimos quadrados ponderados, que foi usado com os modelos esférico, exponencial, gaussiano e família *matérn* ($k = 0,5, 1$ e 2).

Para a seleção do melhor modelo, foi aplicado o teste chamado de *Jack-Knifing*, que avalia a consistência dos dados estimados pela interpolação da krigagem com base em semivariogramas ajustados aos dados experimentais. A estimativa do melhor modelo é considerada quando a média (μ_{jk}) e a variância (σ_{jk}) do erro reduzido são próximas de zero e um, respectivamente (VIEIRA et al., 2010; SOUZA et al., 2017).

Com a seleção do ajuste dos modelos dos semivariogramas, foram identificados os parâmetros efeito pepita (C_0), contribuição (C_0+C_1) e alcance (a). Com esses parâmetros determinados, foi calculado o índice de dependência espacial (IDE), que é obtido pela razão entre o efeito pepita e a contribuição. Posteriormente, foi obtido o grau de dependência espacial (GDE), transformação do IDE para porcentagem, de acordo com Cambardella et al. (1994), que consideram as três graduações de dependência espacial: forte ($GDE < 25\%$), moderada ($25\% \leq GDE \leq 75\%$) e fraca ($GDE > 75\%$).

Para os atributos que apresentaram dependência espacial, foi realizado o mapeamento, a partir da estimativa para os valores em locais não amostrados, executado por meio da interpolação pelo método da krigagem ordinária, definida pela Equação 14:

$$\hat{Z}_i = \sum_{i=1}^n \lambda_i * Z_i \quad \text{Eq. 14}$$

em que: \hat{Z}_i é o valor interpolado; λ_i se refere ao peso atribuído aos valores amostrados (o somatório dos pesos λ_i deve ser igual a um); Z_i é o valor do atributo amostrado; e, n se refere ao número de localidades vizinhas que foram consideradas na interpolação do ponto.

A análise geoestatística e a interpolação, pelo método de krigagem ordinária, que resultou no mapeamento das variáveis foram realizadas no programa R 4.0.2 (R Core Team, 2016), com uso do pacote geoR (DIGGLE; RIBEIRO JUNIOR, 2007) para análise de geoestatística.

3.6 CLASSIFICAÇÃO PELA INDUÇÃO DE ÁRVORES DE DECISÃO

No início do processo de KDD, na etapa de preparação de dados, os valores do atributo classe (referente ao número de indivíduos de *P. brachyurus* encontrados

em 10 gramas de raízes), que originalmente estava na forma de variável contínua, foi convertida em duas classes denominadas “Baixo” e “Alto”, em que foi considerada a densidade populacional do nematoide que pode promover perda de produtividade para a cultura da soja. Para isso, foi adotado como parâmetro a densidade populacional de 820 nematoides em 10 g de raízes de soja⁻¹, para causar a perda de 1 saca de soja ha⁻¹ (FRANCHINI et al., 2014b), em que 48 pontos foi classificado como “Baixa” e 12 como “Alta”. No entanto, a aplicação desse parâmetro, não retornou resultados satisfatórios, com baixo desempenho na avaliação do modelo produzido pela árvore de decisão.

Uma observação sobre a metodologia utilizada por Franchini et al. (2014b), remete ao fato de que a estimativa de perda de soja, atribuída aos danos provocados pelo nematoide fitoparasita, foi realizada com base no coeficiente de correlação estabelecido entre a população de nematoides e a produtividade da soja obtida nos pontos de amostragem. Ressalta-se, porém, que este parâmetro foi estabelecido a partir dos dados krigados, com coeficiente de determinação (R^2) de 0,46 e 0,61, respectivamente. Nesse caso, fica implícito que ao longo do processo, de determinação da perda de soja atribuído aos danos causados por *P. brachyurus*, existe margem para desvios, que na prática significa que a referida perda seja algum valor próximo ao apresentado pelos autores.

O processo de KDD foi realizado com o uso do *software* Weka, versão 3.8 (HALL et al., 2009). Na primeira etapa, foi realizada a tarefa de agrupamento ou clusterização, que é utilizada para separar um conjunto de dados em grupos, com base na maximização da similaridade intra-cluster e minimização da similaridade inter-cluster (GALVÃO; MARIN, 2009). Para isso, foi utilizado o algoritmo EM (*Expectation-Maximization*), que se baseia em modelos de mistura gaussiana. Essa tarefa, agrupa os dados a partir de uma abordagem iterativa que tenta encontrar parâmetros de distribuição que confira a máxima probabilidade de seus atributos (JUNG et al., 2014). A execução desse algoritmo foi realizada no modo de treinamento, configurado para identificar dois grupos distintos de densidade populacional do nematoide. A execução desse algoritmo identificou a presença de 49 e 11 pontos amostrais nas classes “Baixa” e “Alta”, respectivamente (Figura 8).

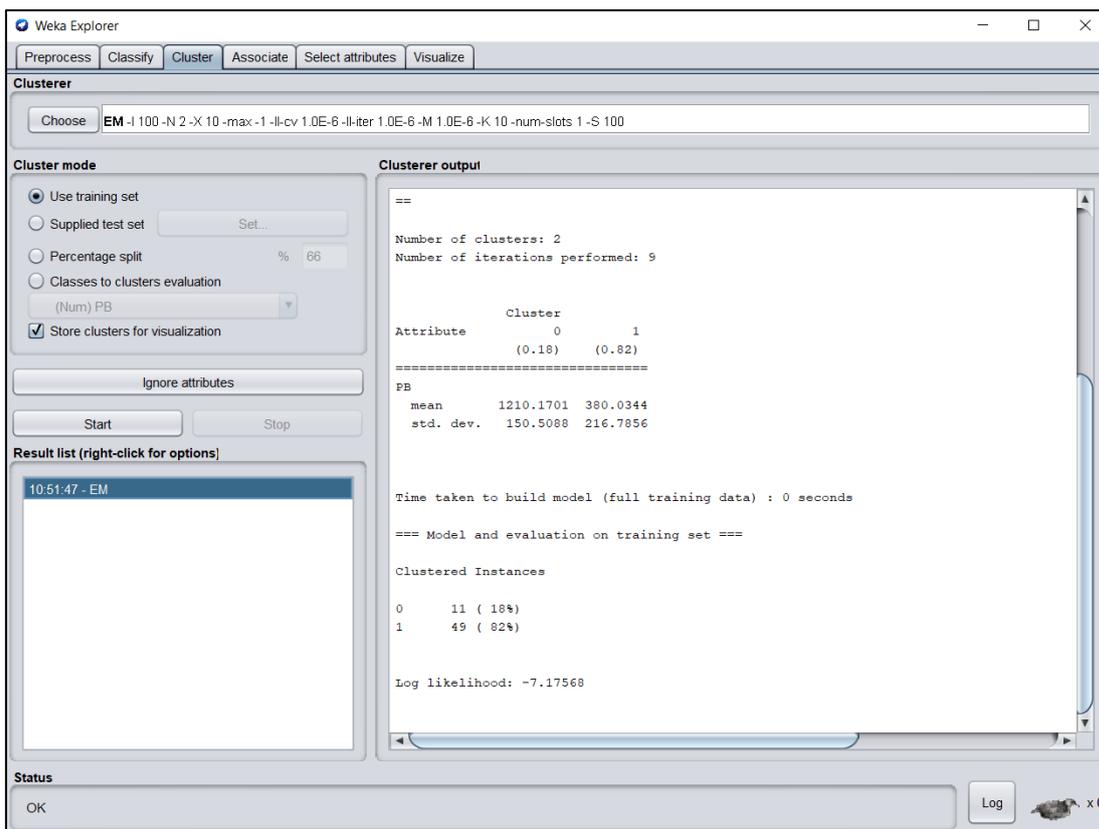


Figura 8. Janela de Seleção de atributos do *software* Weka, utilizando o método de agrupamento EM (*Expectation-Maximization*).

A etapa seguinte, constou da identificação de valores discrepantes (*outliers*) em cada atributo que compõe o conjunto de dados. Para isso, foi utilizado o filtro não supervisionado para detecção por atributo, *InterquartileRange* (Figura 9).

O filtro foi configurado em 1,5 para o fator de discrepância, *outlierFactor*, e 3,0 como fator de valores extremos, *extremeValuesFactor*, para a identificação de valores suspeitos. No entanto, antes de considerar os valores suspeitos como *outlier*, de forma arbitrária, foi realizada uma verificação individual para se certificar de que essas discrepâncias detectadas não se tratavam de variações naturais dos atributos em estudo. Para isso, foi considerado o comportamento dos dados em pontos vizinhos, a frequência no conjunto de dados, ou mesmo, se esse comportamento é característico do atributo em estudo.



Figura 9. Console para configuração do filtro não-supervisionado *InterquartilRange*, da janela de pré-processamento do *software* Weka.

Após essa etapa, foi realizada a junção do conjunto de dados, pela presença de 12 atributos independentes, descritos por valores numéricos, e o atributo classe, discretizados.

A conversão dos valores do atributo classe, pelo uso do algoritmo EM, resultou em 49 e 11 registros nas classes “Baixa” e “Alta”, respectivamente. Essa classificação, concentrou 81,67% dos registros na classe “Baixa” de densidade populacional de *P. brachyurus*. Com a intenção de minimizar o problema de balanceamento entre classes e na busca por padrões, foi utilizado o filtro supervisionado *Resample* (Figura 10), que se encontra na janela de pré-processamento.

Dessa forma, no painel de configurações desse filtro, o parâmetro *biasToUnivormClass* (B) que pode ser ajustado com valores entre 0 e 1, em que: “0”, indica que não há modificação no balanceamento, enquanto “1”, sinaliza que há uma distribuição igualitária entre as classes. Assim, para o reconhecimento de padrões foi

estabelecido com B: 0,40, em que a reamostragem possibilitou alterar o balanceamento contendo 42 e 18 instâncias nas classes “Baixa” e “Alta”, respectivamente. O número de instâncias do conjunto de dados, 60, foi mantido ajustando o parâmetro *sampleSizePercent*.

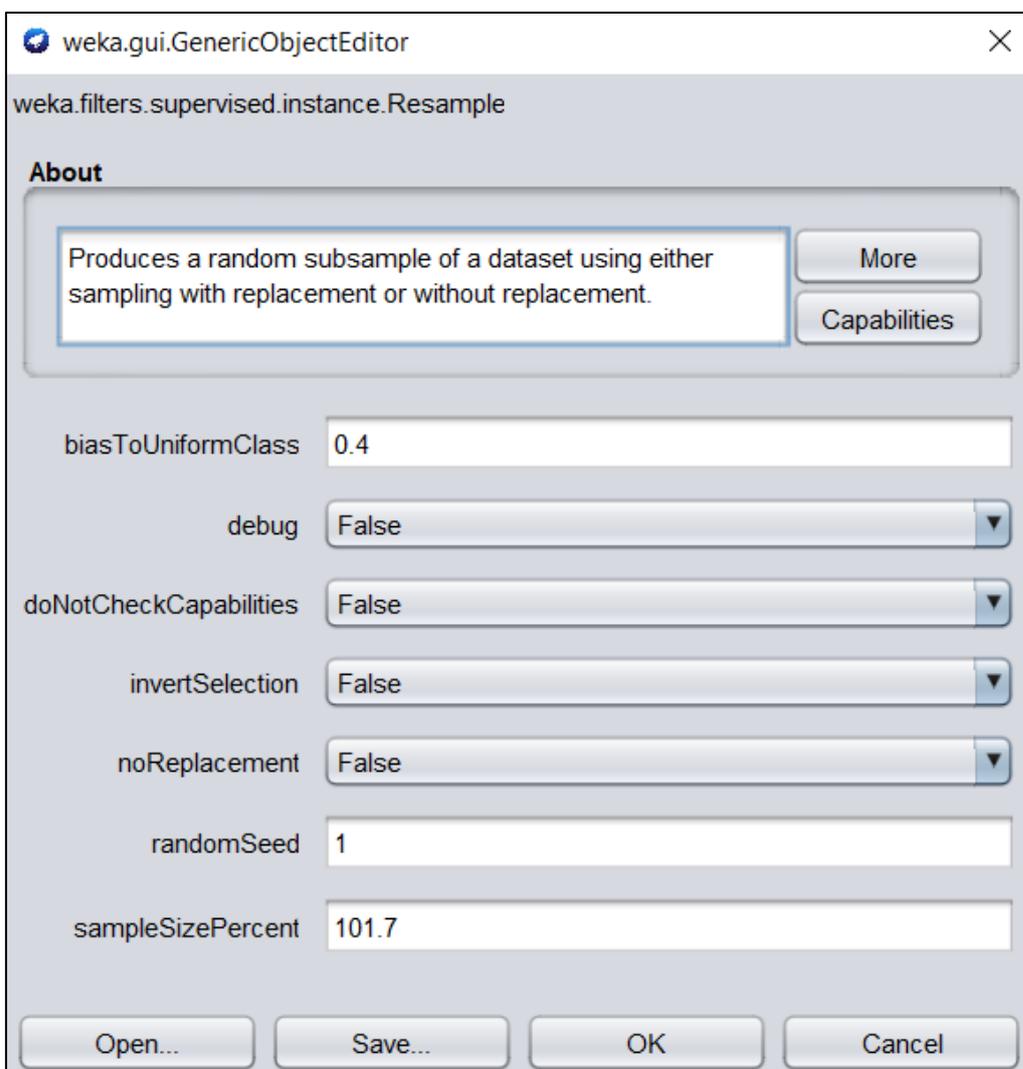


Figura 10. Console para configuração do filtro supervisionado *Resample*, da janela de pré-processamento do *software* Weka.

Posteriormente, foi aplicado um método de seleção de atributos, o *Wrapper* (Figura 11). Esse método de seleção, utiliza a precisão de um classificador, no caso o *J48*, que é induzido para avaliar possíveis subconjuntos de atributos e a repetição do processo ocorre para cada subconjunto de atributos candidato, até que o critério de parada seja satisfeito, resultando, assim, na seleção de apenas um subconjunto de atributos, que melhor representa a distribuição dos dados.

Dessa forma, a execução do *Wrapper* (com *J48*) selecionou os atributos pH, P e K, que foram considerados como os atributos que resumizam o conjunto de dados em estudo. Os demais atributos foram retirados do conjunto de dados.

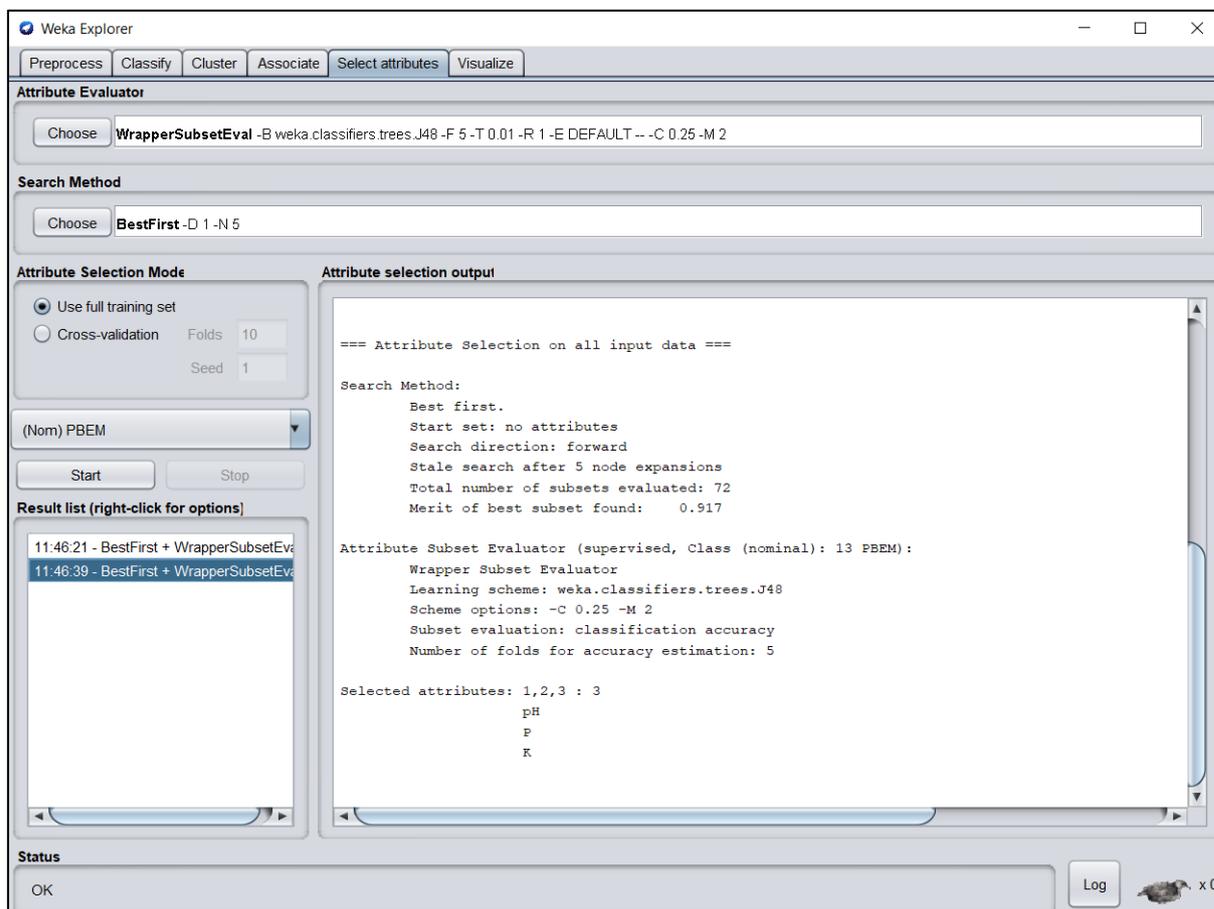


Figura 11. Janela de Seleção de atributos do *software* Weka, utilizando o método (J48) e os atributos selecionados: pH, P e K.

A classificação do conjunto de dados foi realizada pela indução do algoritmo de árvore de decisão *J48* (Figura 12), implementação do modelo *C4,5* (QUINLAN, 1993).

A avaliação do modelo construído foi realizada pelo método da validação cruzada com cinco subconjuntos. Nesse método, o conjunto de dados é subdividido em k partições, no caso cinco, em que quatro partes são utilizadas para o treinamento do modelo e uma parte para a validação. Esse processo é repetido k (5) vezes, até que todo o conjunto de dados (100%) seja amostrado. Com isso, em cada uma das k partições do conjunto de dados, são gerados os parâmetros de avaliação, que serão considerados para a seleção do modelo.

Classifier

Choose **J48 - C 0.25 - M 2**

Test options

Use training set
 Supplied test set
 Cross-validation Folds
 Percentage split %

(Nom) PBEM

Result list (right-click for options)

11:48:02 - trees.J48

Classifier output

```

Time taken to build model: 0 seconds

=== Stratified cross-validation ===
=== Summary ===

Correctly Classified Instances      55           91.6667 %
Incorrectly Classified Instances    5            8.3333 %
Kappa statistic                    0.8047
Mean absolute error                 0.097
Root mean squared error            0.2692
Relative absolute error            22.8747 %
Root relative squared error        58.6137 %
Total Number of Instances         60

=== Detailed Accuracy By Class ===

          TP Rate  FP Rate  Precision  Recall  F-Measure  MCC   ROC Area  PRC Area  Cl
          0,929   0,111   0,951     0,929   0,940     0,805  0,942   0,957   BA
          0,889   0,071   0,842     0,889   0,865     0,805  0,942   0,881   AL
Weighted Avg.   0,917   0,099   0,918     0,917   0,917     0,805  0,942   0,935

=== Confusion Matrix ===

 a  b  <-- classified as
39  3  | a = BAIXO
 2 16 | b = ALTO

```

Status

OK x 0

Figura 12. Janela de classificação do *software* Weka, com a aplicação do método J48 e parâmetros de desempenho do classificador.

Os resultados obtidos pela indução da árvore de decisão, foram avaliados pela acurácia, que se refere à proporção das instâncias corretamente classificadas, e índice *Kappa*, que mede as concordâncias compensando o acaso. Para a avaliação por classe, foram utilizados os parâmetros precisão, que estima a qualidade da predição para a classe positiva, e *recall*, que permite a avaliação da eficiência do classificador para exemplos positivos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na contagem de nematoides foram contabilizados 31.663 indivíduos de *P. brachyurus*. Além do nematoide das lesões radiculares, objeto do presente estudo, foram observados outros nematoides parasitas de plantas na área, tais como *Helicotylenchus* sp. e *Meloidogyne* sp., bem como algumas espécies de nematoides de vida livre. A ocorrência de populações mistas de nematoides fitoparasitas em áreas de cultivo da região, já foi relatada anteriormente. Asmus (2004), realizou um levantamento dos nematoides envolvendo, *P. brachyurus*, *M. incognita* e *R. reniformis*, espécies mais importantes em áreas de produção de algodão do Mato Grosso do Sul. Dentre os municípios que compõem a região Cone Sul/MS, foram identificadas 42 áreas de produção de algodão, das quais em 33,33% ocorriam populações mistas, de *P. brachyurus* e *M. incognita*, além de algumas áreas onde foram encontradas todas as espécies envolvidas no levantamento.

Com relação as análises físico-químicas de solo, se destaca a remoção do atributo matéria orgânica do conjunto de dados. A opção pela retirada se deu por incoerência verificada nos laudos para esse atributo, 30,11 g dm⁻³ em média, em relação aos resultados de outras amostragens, com média de 17,46 g dm⁻³, realizadas na área e encaminhada para outros laboratórios, na mesma safra e safras anteriores. Ressalta-se a importância da matéria orgânica para o manejo de nematoides fitoparasitas, uma vez que o aumento nos teores desse atributo pode induzir a redução populacional de nematoides fitoparasitas, que pode ocorrer por ação direta, pela liberação de compostos tóxicos, ou indiretas, pelo aumento de inimigos naturais no ambiente (MATOS et al., 2011). Costa et al. (2014) avaliaram a influência de plantas de cobertura sobre a densidade populacional de *P. brachyurus* e na soja em áreas com diferentes teores de matéria orgânica, 1,8 e 3,5% de matéria orgânica. Os resultados observados, evidenciaram que a área com maior teor de matéria orgânica resultou na maior produtividade, bem como redução na densidade populacional do nematoide fitoparasita, que foram mais intensos quando a o cultivo da soja ocorria após o cultivo de boas antagonistas ao nematoide fitoparasita, com destaque para *C. spectabilis*.

As condições climáticas ao longo do ciclo da cultura, conforme se pode observar na Figura 6, decorreu de forma favorável para a germinação, emergência, desenvolvimento inicial, até o início da fase reprodutiva da cultura. Porém, o período

que compreende ao decêndio final de novembro até o final de janeiro, transcorreu sob condições de deficiência hídrica temporária, na maior parte desse período. Ressalta-se que o aumento do déficit hídrico, o qual pode ser caracterizado como intenso e prolongado no mês de dezembro, especialmente nos primeiros decêndios de dezembro, afetou não só o desenvolvimento, mas também provocou morte de plantas.

Quanto ao período de restrição hídrica, no terceiro decêndio do mês de novembro, não se observou visualmente alterações nas condições da lavoura, quando se encontrava no estágio R3. Isso se deve ao volume pluviométrico suficiente observado no decêndio anterior, que mesmo com o baixo volume pluviométrico do último decêndio de novembro, ainda mantinha boas condições da lavoura. O máximo da demanda hídrica na cultura da soja, entre 7 e 8 mm dia⁻¹, ocorre da floração até o enchimento de grãos (EMBRAPA, 2013), que coincidiu com o período de maior intensidade de déficit hídrico observado ao longo do ciclo do cultivo. Gava et al. (2015), observaram os efeitos, para a cultura da soja, da redução no fornecimento de água de irrigação em 50% nos períodos vegetativo (V2-V12), de floração (R1-R3), no enchimento de grãos (R4-R6) e na maturação (R7-R8). Os autores observaram que o único período em que foi observado perda de produtividade foi pela restrição hídrica na fase de enchimento de grãos, quando a perda foi tão elevada quanto com restrição permanente, ao longo de todo o ciclo da soja.

4.1 ANÁLISE DESCRITIVA

Os resultados da estatística descritiva dos dados são apresentados na Tabela 2. Com base nos níveis de interpretação de componentes de solo para efeito da interpretação de análises de solo (EMBRAPA, 2013), foi observado alto teor médio apenas para o Mg, enquanto os de P, Ca e K se enquadraram na faixa intermediária de interpretação. Para *P. brachyurus*, a média foi de 527,73 indivíduos 10 g⁻¹ de raízes de soja. Essa média observada, indica que a média de perda seria inferior a 1 (uma) saca de soja ha⁻¹, considerando os resultados observados por Franchini et al. (2014b), que determinaram que são necessários 820 indivíduos do fitoparasita para causar tal perda.

Tabela 2. Análise descritiva, com os valores mínimos e máximos, média, mediana, coeficiente de variação (CV), coeficiente de assimetria (Cs), coeficiente de curtose (Ck) e estatística do teste de *Kolmogorov-Smirnov* (D) dos atributos do solo e densidade populacional de *Pratylenchus brachyurus*

Atributo	Mín	Máx	Média	Mediana	CV	Cs	Ck	D
pH	3,95	5,19	4,48	4,43	6,81	0,56	-0,58	0,13
P	3,01	37,73	13,98	11,72	60,30	0,86	-0,10	0,12
K	0,05	0,19	0,10	0,09	36,19	0,69	-0,54	0,20*
Ca	1,10	3,40	1,98	1,80	29,16	0,60	-0,38	0,14
Mg	0,70	1,30	1,07	1,10	16,75	-1,11	-0,09	0,36*
Al	0,00	0,82	0,23	0,20	76,40	1,03	0,78	0,13
H+Al	1,90	6,50	4,56	4,80	20,21	-0,59	0,10	0,14
CTC	2,30	4,82	3,37	3,34	17,48	0,32	-0,24	0,09
V	25,76	67,54	41,00	40,23	24,01	0,57	-0,25	0,13
Areia	64,34	79,36	70,65	69,36	4,84	0,53	-0,12	0,20*
Silte	2,60	9,28	6,83	5,97	27,06	-0,33	-0,50	0,19*
Argila	14,72	28,04	22,52	23,02	14,07	-0,11	-0,69	0,14
Pb raiz	98,84	1458,82	527,73	509,69	72,38	0,86	-0,31	0,14

pH (CaCl₂); P (mg dm⁻³); K, Ca, Mg, Al, H+Al e CTC efetiva (cmol_c dm⁻³); V, areia, silte e argila (%); Pb raiz (densidade de *P. brachyurus* em 10 gramas de raízes); e, * significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste *Kolmogorov-Smirnov*. Fonte: Dados da pesquisa (2021).

A média observada de pH foi 4,48. Segundo Novais et al. (2007), o valor de pH do solo na faixa de 5,5 e 6,5 é adequado para o crescimento e desenvolvimento da maioria das espécies cultivadas. Os autores argumentam que o pH afeta diretamente ou indiretamente, a disponibilidade de nutrientes para as plantas, tal como no caso do P, que limita o crescimento de plantas, na maioria dos solos brasileiros, se torna muito pouco disponível em condições de acidez, bem como de K, Ca e Mg, que apresentam maior disponibilidade na faixa entre 6,0 e 6,5.

Ressalta-se que o Al, presente em praticamente todos os resultados das análises de solo, embora não seja encontrado sob altos teores (EMBRAPA, 2013), é indesejável e, juntamente com o H⁺, constituem a acidez potencial (H + Al). Estes, são retidos junto aos coloides do solo, saturando suas cargas negativas, com conseqüente impacto sobre o pH, que é reduzido ao passo que ocorre o aumento da acidez potencial. Gitti et al. (2018) indicam alguns critérios para a tomada de decisão sobre necessidade de calagem no Mato Grosso do Sul, tais como as que se baseiam na acidez do solo (pH), nos valores de saturação por bases (V) e pela presença de alumínio trocável, que foram satisfeitos e indicam a necessidade de calagem na área

de estudo. A execução dessa prática de manejo, pode contribuir para fornecer melhores condições para o desenvolvimento de plantas, tanto pela redução da acidez do solo, como por influenciar positivamente na disponibilidade de outros nutrientes, tal como de P e K (NOLLA et al., 2020).

Com relação à normalidade, pelo teste de *Kolmogorov-Smirnov* ($p < 0,05$), foi confirmada para a maioria dos atributos, não sendo verificada distribuição normal para o K, Mg, areia e silte. Alguns autores comentam que a normalidade não é uma exigência para a execução da análise geoestatística (SOUZA et al., 2010; YAMAMOTO, 2020). No entanto, quando o pressuposto de normalidade é atendido, existe a possibilidade de uma qualidade melhor da predição para os valores não amostrados (CHERUBIN et al., 2015).

O coeficiente de curtose, evidencia a dispersão (achatamento) da distribuição em relação à curva normal, em que: se $C_k = 0$ a distribuição é mesocúrtica, se $C_k < 0$ platicúrtica e se $C_k > 0$ leptocúrtica (SILVA et al., 2010). Dentre os valores do coeficiente de curtose observados, apenas os atributos Al e H+Al apresentaram distribuição leptocúrtica, com valor extremo de 0,78 observado para o Al. Para os demais atributos, foram observados valores negativos, distribuição platicúrtica, com extremo de -0,69 para argila. Esses valores extremos de coeficiente de curtose, corroboram com os observados por Silva et al. (2010), que consideram que esses valores de coeficiente de curtose provocam achatamento reduzido da curva de distribuição normal, uma vez que se encontraram próximos de zero.

De acordo com Silva et al. (2010), o coeficiente de assimetria é um parâmetro estatístico utilizado para caracterizar como e quanto a distribuição de frequências se afasta da distribuição simétrica, quando $C_s = 0$, se $C_s > 0$, a distribuição é assimétrica à direita, enquanto, se $C_s < 0$, a distribuição é assimétrica à esquerda. Assim, foram observados valores de assimetria negativa para H+Al, Mg, silte e argila, que apresentam assimetria à esquerda, enquanto os demais atributos, apresentaram valores positivos, ou seja, distribuição assimétrica à direita. Embora os atributos Mg, silte e argila, não tenham apresentado normalidade na distribuição, a assimetria negativa desses atributos não compromete a qualidade da predição da interpolação por krigagem (YAMAMOTO, 2020).

Quanto ao CV, foram observados altos valores para os atributos P, K, Mg, Al e na densidade de *P. brachyurus*, conforme a escala de Warrick e Nielsen (1980), que considera baixo ($CV \leq 12\%$), médio ($12 < CV \leq 60\%$) e alto ($CV > 60\%$). Os elevados

CV observados para os atributos P e AI, foram encontrados também por Pimentel (2014). O autor atribuiu, no caso do P, a elevada amplitude encontrada nas áreas estudadas quanto à textura do solo, em que foram observadas pelo menos três classes texturais nos talhões estudados. Alguns autores argumentam que altos valores de CV, comumente encontrados para alguns atributos, tais como P ou K, ocorrem devido às sucessivas aplicações de fertilizantes na linha de semeadura, que pode conduzir ao aumento da variabilidade espacial desses atributos (CHERUBIN et al., 2015; FAGUNDES et al., 2018).

Com relação ao nematoide fitoparasita, *P. brachyurus*, também apresentou CV alto, com 72,38%. Abade et al. (2016), em estudo centrado na variação espacial de nematoides, observaram CV de 122,66% para a mesma espécie em amostras de solo e raízes em uma das coletas realizadas, enquanto em outra safra foram observadas 157,74 e 104,97%, em amostras de solo e raízes, respectivamente. Da mesma forma, Gabia (2017), observou CV entre 400 e 586% em diferentes amostragens de nematoides no mesmo ciclo de soja. Assim, os resultados obtidos no presente estudo, corroboram com o alto nível de CV da densidade populacional de nematoides em estudos realizados no campo (ABADE et al., 2016; FREITAS et al., 2019; GABIA, 2017), que pode caracterizar a distribuição agregada e irregular desses organismos (ABADE et al., 2016; FERRAZ; BROWN, 2016; KANDEL et al., 2018).

Os padrões de amostragens indicados para a avaliação de doenças de plantas numa área são o aleatório e o sistemático (GOULART, 2009; BEZOOIJEN, 2006). Nos casos em que a população se caracteriza pela dispersão agregada, antes da amostragem, como é o caso de nematoides parasitas de plantas, as parcelas de campo podem ser estratificadas, baseado num parâmetro relevante para o organismo em estudo. Nesse caso, Bezooijen (2006), indica que em um ponto amostral devem ser coletadas até três tipos de amostras, do centro de uma reboleira, da região marginal da reboleira e plantas normais, fora da reboleira. No entanto, o centro das reboleiras, não são representativas da realidade, uma vez que as plantas desse estrato provavelmente se apresentam debilitadas, e não proporcionam boas condições para o desenvolvimento dos nematoides (SILVA; MACHADO, 2019). Dessa forma, é possível criar dois estratos de amostragem, o primeiro em pontos marginais das reboleiras, onde a população de nematoides tende a ser representativa da realidade, e outra fora das reboleiras, onde as plantas estão sadias (GOULART, 2009).

Nesse sentido, é possível que a adoção de uma técnica de amostragem que se baseie na ocorrência de reboleiras na lavoura, sintoma da presença de nematoides, seja mais adequada para o estudo desses organismos. Para isso, os pontos de amostragem podem ser definidos com base em observações de anos anteriores e/ou da safra em andamento, com auxílio de ferramentas de sensoriamento remoto orbital e/ou suborbital. No primeiro grupo, estão as imagens de satélite, normalmente geradas em anos anteriores, que podem ser obtidas de forma relativamente simples em bancos de imagens. Por outro lado, o sensoriamento remoto suborbital contempla o uso de drones ou sensores acoplados em máquinas e implementos agrícolas (GREGO et al., 2014). Com isso, é possível identificar e direcionar os pontos de amostragem nas reboleiras, estrato sob influência do organismo em estudo, e fora das reboleiras, que representam as plantas saudáveis.

4.2 ANÁLISE GEOESTATÍSTICA

A análise geoestatística realizada pelo ajuste dos semivariogramas confirmou a presença de dependência espacial para todos os atributos químicos analisados (Tabela 3), enquanto para os atributos físicos foram observadas dependência espacial para os teores de areia e argila. No entanto, para os teores de silte e densidade de *P. brachyurus*, não foram encontrados ajustes aos modelos de semivariogramas, ou seja, esses atributos apresentam distribuições independentes, conhecidas como efeito pepita puro.

Os atributos pH, Mg, V, areia e argila, tiveram melhor ajuste ao modelo gaussiano, enquanto P, Ca, Al e CTC se enquadraram ao modelo esférico e K e H+Al a família *Matérn*, com k 1 e 2, respectivamente (Tabela 3). Grande parte dos trabalhos que utilizam a geoestatística para descrever a variabilidade espacial de atributos de solo, utilizam o modelo esférico para o ajuste do semivariograma (SOUZA et al., 2010; WOJCIECHOWSKI et al., 2009). Cabe ressaltar, também, o elevado número de atributos químicos que tiveram ajuste ao modelo gaussiano. Segundo WOJCIECHOWSKI (2006), esse comportamento pode ocorrer em situações cuja distribuição dos dados não apresenta normalidade, nesse caso, o modelo gaussiano poderia se destacar em relação ao esférico, como ocorreu para os atributos Mg e areia.

Tabela 3. Parâmetros geoestatísticos dos variogramas omnidirecionais ajustados aos atributos físico-químicos e densidade populacional de *Pratylenchus brachyurus*

Atributo	Modelo	EPP	Contribuição	Alcance	IDE	GDE	μ_{jk}	σ_{jk}
pH	Gaus ¹	0,049	0,064	254,56	0,43	Mod ⁵	0,004	1,151
P	Esf ²	47,349	26,531	228,03	0,64	Mod	-0,003	0,984
K	Mat1 ³	0,001	0,0022	458,27	0,29	Mod	0,002	1,040
Ca	Esf	0,106	0,183	103,18	0,37	Mod	0,001	1,067
Mg	Gaus	0,025	0,020	377,25	0,56	Mod	0,002	1,083
Al	Esf	0,012	0,017	140,94	0,41	Mod	-0,001	1,060
H+Al	Mat2 ⁴	0,396	1,336	180,99	0,23	For ⁶	0,000	1,195
CTC	Esf	0,0516	0,240	90,45	0,18	For	0,001	1,102
V	Gaus	50,770	122,278	388,18	0,29	Mod	0,004	1,071
Areia	Gaus	5,360	31,902	565,52	0,14	For	-0,002	1,031
Silte	EPP	-	-	-	-	-	-	-
Argila	Gaus	5,006	16,034	427,44	0,24	For	-0,001	0,989
Pb	EPP	-	-	-	-	-	-	-

EPP: efeito pepita puro; IDE: índice de dependência espacial; GDE: grau de dependência espacial; μ_{jk} : média do erro reduzido; e, σ_{jk} : variância do erro reduzido; ¹gaussiano; ²Esférico; ³Matérn1; ⁴Matérn2; ⁵Moderada; e, ⁶Forte. Fonte: Dados da pesquisa (2021).

Segundo Grego et al. (2014), o modelo gaussiano representa os processos de maior continuidade, com um crescimento lento na origem e um ponto de inflexão próximo ao alcance. Dessa forma, o alcance observado para os atributos areia e argila, foram 565,52 e 427,44 m, respectivamente, e estiveram entre os maiores dentre os atributos estudados, bem como, resultaram em forte dependência espacial.

Bottega et al. (2013), observaram comportamento semelhante dos atributos que compõem a textura do solo, com elevados valores de alcance para areia e argila, de 490 e 900 m, respectivamente, sendo a argila o atributo de menor variabilidade e maior continuidade espacial, conforme pode ser observado na Figura 13, que possibilitou elevada precisão nas estimativas em locais não amostrados. Os autores argumentam que esse comportamento pode estar associado aos fatores de formação do solo, tais como o material de origem e o processo de intemperismo, que são determinantes para a definição dos teores desses atributos. De fato, os fatores intrínsecos de formação do solo, por meio do material de origem, clima, atividade dos organismos e o tempo, determinam a variabilidade desses atributos, como ocorre com a textura e a mineralogia do solo (CAMBARDELLA et al., 1994; WOJCIECHOWSKI et al., 2009).

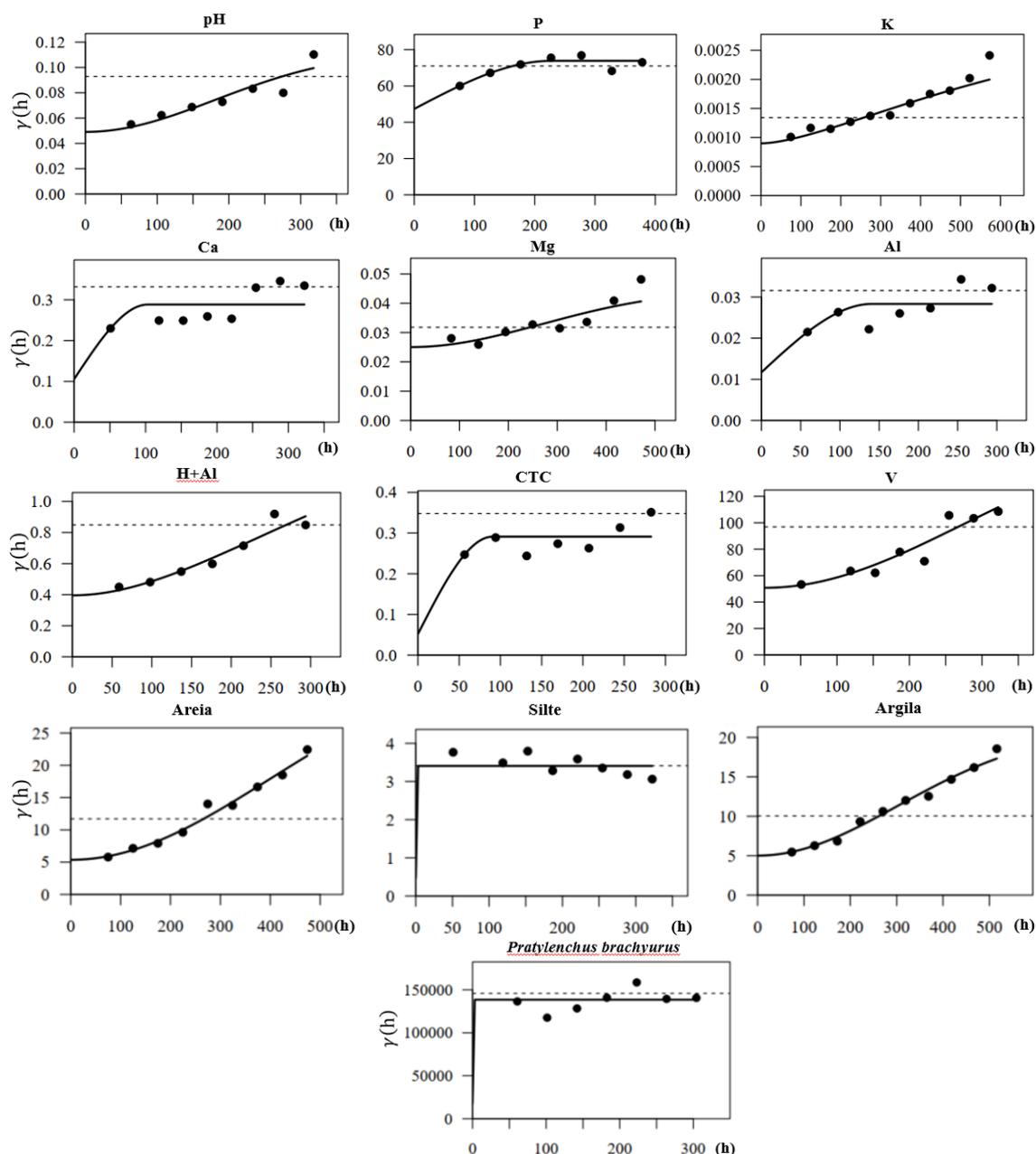


Figura 13. Semivariogramas ajustados dos atributos físico-químicos e densidade populacional de *Pratylenchus brachyurus*. P: fósforo; K: potássio; Ca: cálcio; Mg: magnésio; Al: Alumínio; H+Al: acidez potencial; CTC: capacidade de troca catiônica; e, V: saturação por bases. Fonte: Dados da pesquisa (2021).

Com relação ao nematoide fitoparasita, *P. brachyurus*, o resultado indica efeito pepita puro. Para que isso ocorra, o seu efeito pepita é igual ao seu patamar e indica ausência de dependência espacial do atributo em análise. Essa ocorrência, o efeito pepita puro, poderia ser interpretada como distribuição espacial homogênea do atributo na área de estudo, mas também que a variabilidade seja aleatória. A variabilidade aleatória pode ocorrer devido a erros de medição, de amostragem, ou

devido à malha amostral utilizada ser insuficiente para detectar essa variação, ou seja, a densidade amostral maior que o necessário para detectar a dependência espacial (CAMBARDELLA et al., 1994).

Ao considerar a independência espacial observada para *P. brachyurus*, é possível que tal problema seja minimizado com o aumento da densidade amostral na área de estudo. No entanto, a distribuição agregada e irregular desses organismos, dificulta a detecção da variabilidade espacial, o que torna comum estudos em que são relatados a independência espacial na distribuição de nematoides, mesmo com elevadas densidades amostrais, iguais ou superiores a 100 amostras ha⁻¹ (DINARDO-MIRANDA; FRACASSO, 2009; ABADE et al., 2016; GABIA, 2017). Nesse caso, devido à exigência de elevada densidade amostral necessária para descrever a variabilidade espacial desses organismos, a aplicação da técnica de geoestatística pode ter seu processo inviabilizado, em função do elevado custo para a obtenção de dados (GREGO et al., 2014). Conforme comentado anteriormente, a adoção de ferramentas de sensoriamento remoto, com base no mapeamento das áreas através do comportamento espectral da vegetação, pode contribuir para viabilizar investigações que tenham como alvo os nematoides parasitas de plantas. Assim, em vez do uso da grade amostral, o direcionamento das amostragens se dá a partir da identificação de reboleiras na área de estudo, e pela definição dos pontos amostrais, dentro e fora das reboleiras (GOULART, 2009).

Com relação aos atributos químicos, observa-se que pH, P, K, Ca, Mg, Al e V, foram classificados com grau de dependência espacial moderada, enquanto apenas H+Al e CTC foram classificados com forte dependência espacial.

Dentre os atributos químicos, o P foi o atributo que apresentou o maior IDE, embora tenha sido identificado como grau de dependência espacial moderado (Figura 14). Cherubin et al. (2015), argumentam que o P e o K são aplicados regularmente na linha de semeadura em áreas de cultivo intensivo, fato que resulta na manutenção ou aumento da variabilidade espacial desses atributos no solo.

Esses resultados, tal como os observados para o P e o K, podem refletir a influência dos fatores extrínsecos sobre os atributos químicos analisados. Os fatores extrínsecos se referem às atividades de manejo, tais como fertilizações, intervenções mecânicas de preparo de solo, rotação de culturas, dentre outros, e tendem a reduzir a dependência espacial (CAMBARDELLA et al., 1994; WOJCIECHOWSKI et al., 2009).

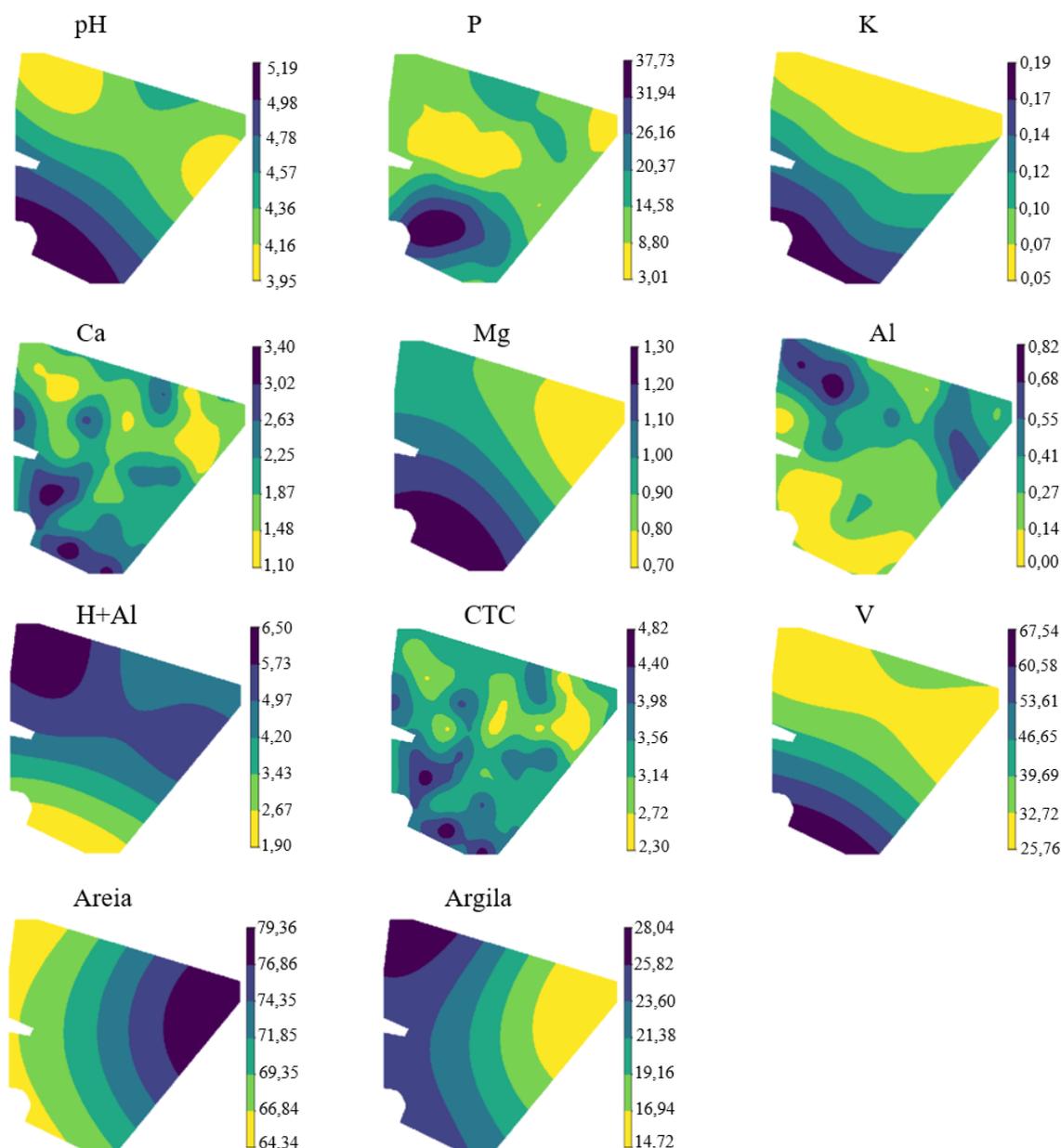


Figura 14. Mapas de distribuição espacial dos atributos físico-químicos do solo. P: fósforo; K: potássio; Ca: cálcio; Mg: magnésio; Al: Alumínio; H+Al: acidez potencial; CTC: capacidade de troca catiônica; e, V: saturação por bases. Fonte: Dados da pesquisa (2021).

4.3 ÁRVORE DE DECISÃO

A validação cruzada realizada sobre os resultados da árvore de decisão, gerou médias para alguns parâmetros estatísticos (Tabela 4). Do ponto de vista global, foram observadas acurácia de 91,99%, que representa a porcentagem de acerto, e índice *Kappa* de 0,81, que representa a correspondência quase perfeita (LANDIS;

KOCH, 1977). Quanto ao desempenho da classificação para as classes “Alta” e “Baixa”, as médias de precisão foram de 0,84 e 0,96, bem como 0,90 e 0,93 para *recall*, que corresponde à taxa de acertos para a classe positiva.

Tabela 4. Resultado da árvore de decisão por validação cruzada ($k = 5$) e os parâmetros de avaliação acurácia, índice *Kappa*, precisão e *recall*

Conjunto	Acurácia	<i>Kappa</i>	Precisão		<i>Recall</i>	
			Baixa	Alta	Baixa	Alta
Média	91,99	0,81	0,96	0,84	0,93	0,90
Desvio Padrão	0,75	0,02	0,01	0,00	0,00	0,02
Coefficiente de Variação (%)	0,81	2,28	1,12	0,42	0,00	2,73

Fonte: Dados da pesquisa (2021).

Com relação aos parâmetros globais analisados, acurácia e o índice *Kappa*, estes podem ser considerados expressivos, embora o interesse em trabalhos dessa natureza é a extração de conhecimento, não priorizando a precisão do classificador (LIMA et al., 2013). Da mesma forma, ao analisar os parâmetros por classe, “Alta” e “Baixa”, quanto aos parâmetros precisão e *recall*, o comportamento pode ser considerado consistente. Apesar do desbalanceamento observado, especialmente, ao considerar que na classe “Alta” de densidade populacional de *P. brachyurus*, que contou com apenas 18 observações nessa classe, foram observados índices de acerto elevados para os parâmetros avaliados, precisão e *recall*.

Na árvore de decisão obtida (Figura 15), de todos os atributos que compuseram a base de dados, foram identificados três atributos preditores para distinguir as classes com “Alta” e “Baixa” de densidade populacional de *P. brachyurus*. Os atributos foram pH, P e K, dentre eles, o pH pode ser interpretado como o atributo de maior importância. Isso se deve ao fato de que o nó-raiz, que faz a primeira divisão dos dados, indica que o atributo o qual assume essa posição, no caso o pH, é o de menor entropia e que otimiza o processo de geração da árvore de decisão, sendo identificado, também, como o atributo que apresenta o maior ganho de informação no conjunto de dados (QUINLAN, 1993), além de estar presente em todas as regras geradas pela árvore de decisão.

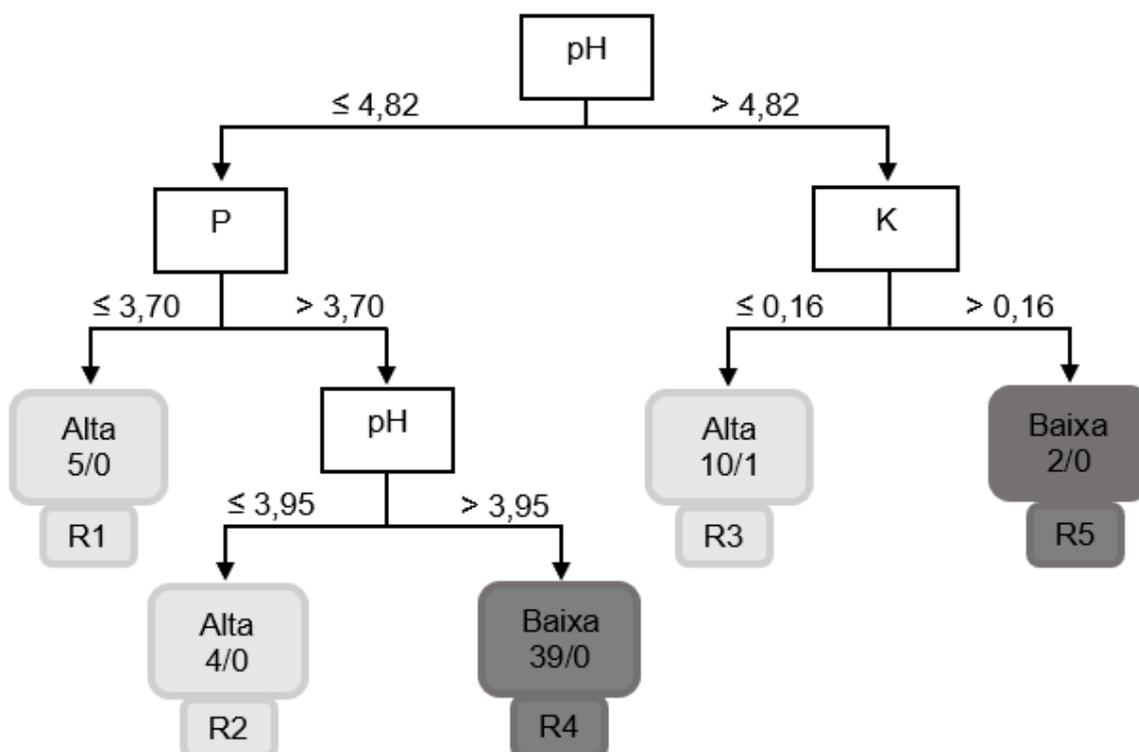


Figura 15. Árvore de decisão (J48), gerada no *software* Weka, sobre os níveis de densidade populacional de *Pratylenchus brachyurus*. Atributos pH (CaCl₂), fósforo (P) e potássio (K). Fonte: Dados da pesquisa (2021).

A saída do processo de classificação da árvore de decisão, onde cada ramo das extremidades é chamado de nó folha, foi representado pelas classes “Alta” e “Baixa”, e, reflete a influência dos atributos que estão presentes nos nós que antecedem o nó folha. Com isso, cada regra de classificação se inicia pelo nó raiz, se estende através dos respectivos nós e ramos filhos, até alcançar o nó de decisão, chamado de nó folha, conforme descrição apresentada na Tabela 5.

Tabela 5. Regras de classificação obtidas pela indução do algoritmo J48, no *software* Weka, para a densidade populacional de *Pratylenchus brachyurus*

Regra	Descrição	Resultado	Acertos/Erros
R1	se pH ≤ 4,82 e P ≤ 3,70	Alta	5/0
R2	se pH ≤ 4,82 e P > 3,70 e pH ≤ 3,95	Alta	4/0
R3	se pH > 4,82 e K ≤ 0,16	Alta	10/1
R4	se pH ≤ 4,82 e P > 3,70 e pH > 3,95	Baixa	39/0
R5	se pH > 4,82 e K > 0,16	Baixa	2/0

Fonte: Dados da pesquisa (2021).

A R1, indica que se o $\text{pH} \leq 4,82$ e $P \leq 3,70$, a densidade de *P. brachyurus* observado é “Alta”. No caso da R2, a densidade “Alta” do nematoide é observado se $\text{pH} \leq 4,82$ e $P > 3,70$ e $\text{pH} \leq 3,95$. Na R3, ocorre “Alta” densidade do nematoide quando o $\text{pH} > 4,82$ e $K \leq 0,16 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Para as regras R1 e R2, não foram observados erros de classificação, com cinco e quatro acertos, respectivamente, enquanto para R3 foi observado um erro e 10 acertos.

A R4, foi estabelecida com 39 acertos, sem nenhum erro. Essa regra determinou que a densidade de *P. brachyurus* é “Baixa” se $\text{pH} \leq 4,82$ e $P > 3,70$ e $\text{pH} > 3,95$ $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Com relação a R5, estabelecida com dois acertos e sem erros, determina que a densidade do nematoide é “Baixa” se o $\text{pH} > 4,82$ e $K > 0,16$.

De uma forma geral, observa-se que na árvore de decisão obtida foi mais consistente para R3 e R4, em que foram observadas nove e 39 ocorrências classificadas corretamente pelo algoritmo, respectivamente. Ressalta-se que essas duas regras concentraram 81,67% das observações do conjunto de dados, que denota a relevância dessas regras em relação ao conjunto de dados. As demais regras obtidas, R1, R2 e R5, representam 18,33% das observações do conjunto de dados, com cinco, quatro e duas observações, respectivamente, com 100% de acertos.

A R5 se mostrou como a regra menos consistente, uma vez que essa regra foi moldada com apenas duas ocorrências, embora com 100% de acertos. Em algumas situações, isso pode indicar a presença de ruídos na base de dados, que pode conduzir a classificações errôneas.

Esse tipo de problema não é incomum em estudos que abordam árvores de decisão. Souza et al. (2010), estudaram a contribuição de atributos de solo na produtividade de cana-de-açúcar e observaram para altitude, onde foi identificada fragilidade nas classes de maiores produtividades. Os autores atribuíram esse comportamento à possibilidade de haver algum outro atributo, não analisado no conjunto de dados, que pudesse contribuir para conferir maior robustez aos resultados. De fato, existem alguns atributos não abordados no presente estudo que apresentam potencial para a identificação de padrões em estudos que envolvem nematoides, tais como o teor de matéria orgânica, comentado anteriormente, a declividade do terreno e a condutividade elétrica aparente do solo (KANDEL et al., 2018), ou mesmo parâmetros do cultivo, como a altura de plantas (FRANCHINI et al., 2018) e a produtividade (DEBIASI et al., 2016b).

Uma outra solução para o de problema seria o aumento no número de observações do conjunto de dados. Na medida em que aumenta a quantidade de dados, aumentam as oportunidades para a identificação de padrões (TAN et al., 2009), bem como o aumento na confiança sobre os resultados observados.

O pH foi o principal atributo nas regras de decisão apresentadas, com participação em todas as regras geradas. O pH é o atributo abiótico de maior importância sobre o desenvolvimento de nematoides (CASTILHO; VOVLAS, 2007). Odeyemi et al. (2016) estudaram ocorrência de nematoides e propriedades físico-químicas em área de pousio na Nigéria. Os autores identificaram, dentre outras, correlações negativas entre o pH e a densidade populacional de *Pratylenchus* sp., *Meloidogyne* sp. e *Helicotylenchus* sp. A menção a essas correlações se torna importante, uma vez que se referem aos mesmos gêneros de nematoides fitoparasitas observados na área do presente estudo, de forma que a correção da acidez do solo pode contribuir para o manejo de todos os nematoides ocorrentes na área de estudo.

A supressão de *P. brachyurus* decorrente do aumento do pH do solo pode estar associada ao aumento na resistência das paredes celulares nas raízes, decorrente da menor acidez do solo, que dificultaria a penetração, movimentação e a alimentação do nematoide (FRANCHINI et al., 2014a).

Debiasi et al. (2016b) observaram que a realização de calagem, aumentou os valores de pH e promoveu redução drástica sobre o número de *P. brachyurus*, resultando em maiores produtividades de soja. Os autores relatam a dificuldade para apontar o quanto o incremento na produtividade de soja se deve às aplicações de corretivos, ou pela redução na população do nematoide fitoparasita. Nesse caso, independente da dificuldade atribuída pelos autores, deve ser ressaltada a importância da correção de acidez do solo no contexto de manejo integrado, uma vez que essa prática resultou em maior rendimento da soja, com ação direta da sobre a densidade populacional do nematoide, bem como pela melhoria na nutrição de plantas, que proporcionou maior desenvolvimento do cultivo.

O P, que foi associado com as classes de densidade populacional de *P. brachyurus*, atua na síntese de proteínas e na atividade celular dos tecidos vegetais, que pode proporcionar maior resistência de plantas ao ataque de nematoides fitoparasitas (MATOS et al., 2011). Assim, Rodríguez-Kábana e Collins (1980), em estudo de longa duração numa área de rotação com culturas anuais, estudaram a influência da adubação sobre a população de *Pratylenchus scribneri*. Os autores

relataram que a supressão da adubação fosfatada resultava em aumento na densidade do nematoide. Da mesma forma, Matos et al. (2011) observaram em cultivos de cana-de-açúcar, reduções na população de *P. brachyurus* com o aumento nos teores de P, que foi associado a menor reprodução do nematoide, ocasionada pelo aumento na produção de vitamina C, polifenóis, peroxidases. Os autores observaram ainda, correlações negativas desse nematoide com V e matéria orgânica, além da correlação positiva com os teores de H, que participa do complexo de acidez.

O K é um importante cátion que participa de diversos processos fisiológicos de plantas, tais como a fotossíntese, ativação enzimática, síntese de proteínas e no equilíbrio iônico, osmótico e entre ânions e cátions (HAFSI et al., 2014). A aplicação de K pode não interferir no processo de infecção por nematoides nas raízes de plantas, mas afeta negativamente a reprodução desses organismos que apresentam fator de reprodução menores, tal como ocorre em *H. glycines* (BARBOSA et al., 2010) e *M. paranaensis* (ROLDI et al., 2017). Esses resultados podem estar relacionados à interferência do K na recepção de sinais pelas membranas celulares, com consequente redução no número de sincícios formados nas raízes das plantas (BARBOSA et al., 2010). Em condições de campo, Odeyemi et al. (2016) observaram correlação negativa entre os teores de potássio e *Pratylenchus* sp. em plantas de *Chromolaena odorata*, vegetação espontânea que se desenvolve no período de entressafra, nas áreas cultivadas da Nigéria. Essas informações denotam a importância do potássio para as plantas, bem como na flutuação populacional de nematoides parasitas de plantas, além disso, indicam a coerência nos resultados apresentados nas R3 e R5 (Tabela 5).

A indução da árvore de decisão, apresentou-se promissora para a resolução do problema apresentado, que possibilitou a geração de cinco regras, das quais duas regras geradas (R3 e R4) podem ser consideradas mais consistentes, enquanto R5 foi a regra com menor consistência. No entanto, a árvore de decisão gerada corrobora quanto à importância de alguns atributos na distribuição do nematoide fitoparásita, que remete ao pH como atributo químico de maior influência (CASTILHO; VOVLAS, 2007; FRANCHINI et al., 2014b), além do P (MATOS et al., 2011) e K (HAFSI et al., 2014), que atuam em diversos processos fisiológicos de plantas.

De uma forma geral, a execução do presente estudo possibilitou conhecer os teores dos atributos físico-químicos, determinar o padrão de distribuição espacial desses atributos e, embora não tenha observado dependência espacial para a

densidade de *P. brachyurus*, foi possível determinar os atributos que mais se relacionam com o nematoide, com a utilização classificação de árvores de decisão.

No talhão utilizado no estudo, foi identificada a presença de elevada acidez do solo, presença de alumínio sob níveis tóxicos e baixa V, remetem à necessidade de calagem (GITTI et al., 2018). Com a execução da calagem e, conseqüentemente, redução da acidez, elevação da saturação por bases e precipitação do alumínio tóxico, além de proporcionar condições favoráveis ao desenvolvimento da cultura, pode proporcionar o aumento na disponibilidade de outros nutrientes, tais como ocorre com o P e K (NOLLA et al., 2020), bem como no manejo de *P. brachyurus* (DEBIASI et al., 2016b; FRANCHINI et al., 2018).

A aplicação das técnicas de geoestatística, possibilitou conhecer a distribuição dos atributos físico-químicos abordados no estudo, tais como a elevada dependência espacial dos atributos que são influenciados por fatores intrínsecos de formação de solos, observados para os teores de areia e argila, bem como a dependência espacial moderada, observada para os atributos que são mais influenciáveis pelos fatores extrínsecos (CAMBARDELLA et al., 1994; WOJCIECHOWSKI et al., 2009), que tem como exemplo típico o P, de aplicação recorrente e restrita à linha de semeadura (CHERUBIN et al., 2015), em áreas de cultivos anuais.

Com relação à densidade populacional de *P. brachyurus*, foi identificada independência espacial, que poderia ser revertida com o aumento na densidade amostral. No entanto, a maior densidade amostral pode, também, não se traduzir em melhora nos parâmetros de distribuição espacial (DINARDO-MIRANDA; FRACASSO, 2009; ABADE et al., 2016; GABIA, 2017), o que pode comprometer a viabilidade de execução do estudo, tanto do ponto de vista econômico quanto operacional (GREGO et al., 2014). Para minimizar problemas dessa natureza, a adoção de ferramentas de sensoriamento remoto pode ser uma boa estratégia para a identificação de reboleiras e direcionamento da amostragem.

A aplicação do processo de KDD, por meio da classificação utilizando o algoritmo de árvore de decisão, J48, mostrou-se promissor. Os padrões identificados poderiam se apresentar de forma mais consistente, pela inclusão de atributos (SOUZA et al., 2010), bem como pelo aumento no número de amostras no conjunto de dados (TAN et al., 2009), que devem ser apreciadas para a realização de trabalhos futuros. No entanto, a árvore de decisão gerada possibilitou a identificação de padrões entre

a densidade populacional de *P. brachyurus* e atributos químicos do solo, com destaque para o pH, além do P e K. Os resultados obtidos, além de expressivos tendo em vista o que foi demonstrado nos índices dos parâmetros avaliação, apresentaram-se coerentes com o conhecimento que envolvem a busca de relações entre a população do nematoide e atributos do solo (CASTILHO; VOVLAS, 2007; FRANCHINI et al., 2014b; MATOS et al., 2011; ODEYEMI et al., 2016).

5 CONCLUSÕES

Os atributos físicos areia e argila apresentaram forte dependência espacial.

A maioria dos atributos químicos foram identificados com moderada dependência espacial.

Não foi observado continuidade espacial para a densidade de *P. brachyurus*.

A classificação pela técnica de árvore de decisão apresentou-se promissora e possibilitou a descoberta de padrões.

O pH, P e K se relacionaram com a densidade população de *P. brachyurus*, numa área de cultivo de soja de Mundo Novo/MS.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABADE, C. L. P.; PEDROSA, E. M. R.; VICENTE, T. F. S.; LEITÃO, D. A. H. S.; MONTENEGRO, A. A. A.; ROLIM, M. M.; GUIMARÃES, L. M. P. Variação espacial de fitonematoides em área de cultivo de feijoeiro após erradicação de goiabeiras. **Nematropica**, Auburn, v. 46, n. 2, p. 172-181, 2016.

ABD-ELGAWAD, M. M.; ASKARY, T. H. Impact of phytonematodes on agriculture economy. In: ASKARY, T. H.; MARTINELLI, P. R. P. (Ed). **Biocontrol agents of phytonematodes**. Wallingford: CAB International, 2015. p. 3-49.

AGÊNCIA DE DEFESA AGROPECUÁRIA DO PARANÁ - ADAPAR. **Pesquisa Agrotóxicos**. Curitiba: Adapar, 2021. Disponível em: <http://www.adapar.pr.gov.br> Acesso em: 12 mar. 2021.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Berlin, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2014.

ASMUS, G. L. Ocorrência de nematoides fitoparasitos em algodoeiro no Estado de Mato Grosso do Sul. **Nematologia Brasileira**, Piracicaba, v. 28, n. 1, p. 77-86, 2004.

BARBOSA, K. A. G.; GARCIA, R. A.; SANTOS, L.C.; TEIXEIRA, R. A.; ARAÚJO, F. G.; ROCHA, M. R.; LIMA, F. S. O. Avaliação da adubação potássica sobre populações de *Heterodera glycines* em cultivares de soja resistente e suscetível. **Nematologia Brasileira**, Piracicaba, v. 34, n. 3, p. 150-158, 2010.

BASGALUPP, M. P. **Legal-Tree**: Um algoritmo genético multi-objetivo lexicográfico para indução de árvores de decisão. 2010, 116f. Tese (Doutorado em Ciências de Computação e Matemática Computacional) - Universidade de São Paulo, Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, São Carlos, 2010.

BEZOOIJEN, J. V. **Methods and techniques for nematology**. Wageningen: Wageningen University, 2006. 112 p.

BOTTEGA, E. L.; QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C.; SOUZA, C. M. A. Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 44, n. 1, p. 1-9, 2013.

BRASIL. Portaria Nº 5, de 21 de agosto de 2015. Define as pragas de maior risco fitossanitário nas principais culturas agrícolas nacionais para fins a priorização dos processos de registro de produtos e tecnologias de controle. **Diário Oficial da União**, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Brasília/DF, ano 152, n. 161, 24 de agosto de 2015, Seção 1, p. 13.

BRASIL. Portaria Nº 82, de 12 de agosto de 2016. Define as pragas de maior risco fitossanitário nas principais culturas agrícolas nacionais para fins a priorização dos processos de registro de produtos e tecnologias de controle. **Diário Oficial da União**,

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Brasília/DF, ano 153, n. 156, 15 de agosto de 2016, Seção 1, p. 1.

CAMARGO, E. C. G. Geoestatística: Fundamentos e aplicações. In: CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. (Ed). Geoprocessamento para projetos ambientais. São José dos Campos: INPE, 1998. 36 p.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.

CARNEIRO FILHO, A.; COSTA, K. **A expansão da soja no Cerrado**: Caminhos para a ocupação territorial, uso do solo e produção sustentável. São Paulo: INPUT, 2016. 30p.

CASTILHO, P.; VOVLAS, N. **Pratylenchus (Nematoda: Pratylenchidae)**: Diagnosis, Biology, Pathogenicity and Management. Leiden: Brill, 2007. 529 p.

CHERUBIN, M. R.; SANTI, A. L.; EITELWEIN, M. T.; AMADO, T. J. C.; SIMON, D. H.; DAMIAN, J. M. Dimensão da malha amostral para caracterização da variabilidade espacial de fósforo e potássio em Latossolo Vermelho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 2, p. 168-177, 2015.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Séries históricas de área plantada, produtividade e produção relativas às safras 1976/77 a 2020/21 de grãos**. Brasília: Conab, 2021. Disponível em: <http://www.conab.gov.br> Acesso em: 16 jan. 2021.

COOLEN, W. A.; D'HERDE, C. J. **A method for the quantitative extraction of nematodes from plant tissue**. Ghent: State of Nematology and Entomology Research Station, 1972. 77 p.

COSTA, M. J. N.; PASQUALLI, R. M.; PREVEDELLO, R. Efeito do teor de matéria orgânica do solo, cultura de cobertura e sistema de plantio no controle de *Pratylenchus brachyurus* em soja. **Summa Phytopathologica**, Botucatu, v. 40, n. 1, p. 63-70, 2014.

DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; DIAS, W. P.; BALBINOT JUNIOR, A. A. Monitoramento da acidez do solo e do nematoide das lesões radiculares em lavouras de soja no Mato Grosso. In: Reunião de Pesquisa de Soja, 34, 2014, Londrina. **Anais...** Londrina: Embrapa Soja, 2014. 3 p.

DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; DIAS, W. P.; RAMOS JUNIOR, E. U.; BALBINOT JUNIOR, A. A. Práticas culturais na entressafra da soja para o controle de *Pratylenchus brachyurus*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 10, p. 1720-1728, 2016a.

DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; DIAS, W. P.; RAMOS JUNIOR, E. U.; BALBINOT JUNIOR, A. A. Produtividade da soja e densidade populacional do nematoide das lesões radiculares em função da correção do solo com calcário, gesso e potássio. In:

Reunião de Pesquisa de Soja, 35, 2016, Londrina, **Anais...** Londrina: Embrapa Soja, 2016b. 3 p.

DEBIASI, H.; MORAES, M. T.; FRANCHINI, J. C.; DIAS, W. P.; SILVA, J. F. V.; RIBAS, L. N. Monitoramento da fertilidade do solo e da ocorrência do nematoide das lesões radiculares em soja no Mato Grosso. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. 33, 2011, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: Sociedade Brasileira de Ciência do solo, 2011. 4 p.

DONG, L. Q.; ZHANG, K. D. Microbial control of plant-parasitic nematodes: a five-party interaction. **Plant and Soil**, Wageningen v. 288, n. 1, p. 31-45, 2006.

DIAS, W. P.; GARCIA, A.; SILVA, J. F. V.; CARNEIRO, G. E. S. **Nematoides em soja: identificação e controle**. Londrina: Embrapa Soja, 2010. 8 p. (Embrapa Soja. Circular Técnica, 76).

DIAS-ARIEIRA, C. R.; ARAÚJO, F. G.; KANEKO, L.; SANTIAGO, D. C. Biological control of *Pratylenchus brachyurus* in soya bean crops. **Journal of Phytopathology**, Berlin, v. 166, n. 10, p. 722-728, 2018.

DIGGLE, P. J.; RIBEIRO JUNIOR, P. J. **Model-based geostatistics**. New York: Springer, 2007. 242 p.

DINARDO-MIRANDA, L. L.; FRACASSO, J. V. Spatial distribution of plant-parasitic nematodes in sugarcane fields. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 66, n. 2, p. 188-194, 2009.

DONAGEMMA, G. K.; FREITAS, P. L.; BALIEIRO, F. C.; FONTANA, S. T. S.; LUMBRERAS, J. F.; VIANA, J. H. M.; ARAÚJO FILHO, J. C.; SANTOS, F. C.; ALBUQUERQUE, M. R.; MACEDO, M. C. M.; TEIXEIRA, P. C.; AMARAL, J. A.; BORTOLON, E.; BORTOLON, L. Caracterização, potencial agrícola e perspectivas de manejo de solos leves no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 9, p. 1003-1020, 2016.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solo**. 2ed. Rio de Janeiro: Embrapa-CNPQ, 1997. 212 p. (Embrapa-CNPQ. Documentos, 1).

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Tecnologias de produção de soja** - Região central do Brasil 2014. 21ed. Londrina: Embrapa Soja, 2013. 268p. (Embrapa-Soja. Sistemas de Produção, 16).

FAGUNDES, R. S.; URIBE-OPAZO, M. A.; GUEDES, L. P. C.; GALEA, M. Slash spatial linear modeling: soybean yeald variability as a function of soil chemical properties. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 42, n. 1, p. 1-18, 2018.

FAYYAD, U.; PIATETSKY-SHAPIRO, G.; SMYTH, P. Knowledge Discovery and Data Mining: Towards a Unifying Framework. In: Proceedings of Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 2, 1996, Portland. **Proceeding...** Portland: AAAI Press, 1996. p. 82-88

FERRAZ, L. C. C. B.; BROWN, D. J. F. **Nematologia de plantas: fundamentos e importância**. Manaus: Norma Editora, 2016. 251 p.

FRANCHINI, J. C.; COSTA, J. M.; DEBIASI, H.; TORRES, E. **Importância da rotação de culturas para a produção agrícola sustentável no Paraná**. Londrina: Embrapa Soja, 2011. 52 p. (EMBRAPA SOJA, Documentos, 327)

FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; DIAS, W. P.; RAMOS JUNIOR, E. U.; BALBINOT JUNIOR, A. A. Densidade populacional do nematoide das lesões radiculares em soja e sua relação com a calagem. In: Reunião de Pesquisa de Soja, 34, 2014, Londrina. **Anais...** Londrina: Embrapa Soja, 2014a. 3 p.

FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; DIAS, W. P.; RAMOS JUNIOR, E. U.; SILVA, J. F. V. Perda de produtividade da soja em área infestada por nematoide das lesões radiculares na região médio norte do Mato Grosso. In: BERNARDI, A. C. de C.; NAIME, J. de M.; RESENDE, A. V. de; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (Ed.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília: Embrapa, 2014b. p. 274-278.

FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; DIAS, W. P.; RIBAS, L. N.; SILVA, J. F. V.; BALBINOT JUNIOR, A. A. Relationship among soil properties, root-lesion nematode population, and soybean growth. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 17, n. 1, p. 30-35, 2018.

FRANCHINI, J. C.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A.; MALAVOLTA, E. Dinâmica de íons em solo ácido lixiviado com extrato de resíduos de adubos verdes e soluções puras de ácidos orgânicos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 12, p. 2267-2276, 1999.

FREITAS, J. R. B.; TEIXEIRA, D. B.; MOITINHO, M. R.; SILVA JÚNIOR, J. F.; SIQUEIRA, D. S.; BARBOSA, B. F. F.; SOARES, P. L. M.; PEREIRA, G. T. Distribuição espacial de *Pratylenchus brachyurus* em área de soja no Leste do Maranhão. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 14, n. 1, p. 1-6, 2019.

GABIA, A. A. **Influência do manejo da cultura da soja na população de *Rotylenchulus reniformis* e seu comportamento espacial**. 2017, 61f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2017.

GALVÃO, N. D.; MARIN, H. F. Técnica de mineração de dados: uma revisão de literatura. **Acta Paulista de Enfermagem**, São Paulo, v. 22, n. 5, p. 686-690, 2009.

GAVA, R.; FRIZZONE, J. A.; SNYDER, R. L.; JOSE, J. V.; FRAGA JUNIOR, E. F.; PERBONI, A. Estresse hídrico em diferentes fases da cultura da soja. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 9, n. 6, p. 349-359, 2015.

GITTI, D. C.; ROSCOE, R.; RIZZATO, L. A. Manejo e fertilidade do solo para a cultura da soja. In: LOURENÇÃO, A. L. F.; GRIGOLLI, J. F. J.; BEZERRA, A. R. G.; GITTI, D. C.; MELOTTO, A. M. (Ed.). **Tecnologia e produção: Safra 2017/2018**. Curitiba: Midiograf, 2018. p. 12-52

GOLDSCHMIDT, R.; BEZERRA, E.; PASSOS, E. **Data Mining**: Conceitos, técnicas, algoritmos, orientações e aplicações. 2ed. Rio de Janeiro-RJ: Elsevier, 2015. 276 p.

GOULART, A. M. C. **Aspectos gerais sobre nematoides-das-lesões-radiculares (gênero *Pratylenchus*)**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2008. 30 p. (EMBRAPA CERRADOS, Documentos, 219).

GOULART, A. M. C. **Coleta de amostras para análise de nematoides: recomendações gerais**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2009. 31 p. (EMBRAPA CERRADOS, Documentos, 255).

GREGO, C. R.; OLIVEIRA, R. P.; VIEIRA, S. R. Geoestatística aplicada a Agricultura de Precisão. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, INAMASU, R. Y. (Ed.). **Agricultura de precisão**: resultados de um novo olhar. Brasília: Embrapa, 2014, p. 76-83.

GUIMARÃES, A. M.; CAIRES, E. F.; SILVA, K. S.; ROCHA, J. C. F. Estimating gypsum requirement under no-till based on machine learning technique. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 46, n. 2, p. 250-257, 2015.

HAFSI, C.; DEBEZ, A.; ABDELLY, C. Potassium deficiency in plants: effects and signaling cascades. **Acta Physiologiae Plantarum**, Kraków, v. 36, n. 5, p. 1055-1070, 2014.

HALL, M.; FRANK, E.; HOLMES, G.; PFAHRINGER, B.; REUTEMANN, P.; WITTEN, I. H. The WEKA Data Mining Software: Na Update. **SIGKDD Explorations**, New York, v. 11, n. 1, p. 10-18, 2009.

HERNANI, L. C.; SALTON, J. C.; FABRÍCIO, A. C.; DEDECEK, R.; ALVES JÚNIOR, M. Perdas por erosão e rendimento de soja e trigo em diferentes sistemas de preparo de um latossolo roxo de Dourados (MS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, n. 4, p. 667-676, 1997.

HIRAKURI, M. H.; LAZZAROTTO, J. J. **O agronegócio da soja nos contextos mundial e brasileiro**. Londrina: Embrapa Soja, 2014. 70 p. (Embrapa Soja. Documentos, 349).

INAMASU, R. Y.; BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; QUEIROS, L. R.; RESENDE, A. V.; VILELA, M. F.; BASSOI, L. H.; PEREZ, N. B.; FRAGALLE, E. P. Estratégia de implantação, gestão e funcionamento da Rede Agricultura de Precisão. In: INAMASU, R. Y.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; BERNARDI, A. C. C. (Ed.). **Agricultura de precisão**: um novo olhar. São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2011, p. 31-40.

INOMOTO, M. M.; MACHADO, A. C. Z.; ANTEDOMÊNICO, S. R. Reação de *Brachiaria* spp. e *Panicum maximum* a *Pratylenchus brachyurus*. **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, v. 32, n. 4, p. 341-344, 2007.

JANK, L.; BARRIOS, S. C.; VALLE, C. B.; SIMEÃO, R. M.; ALVES, G. F. The value of improved pastures to Brazilian beef production. **Crop and Pasture Science**, Clayton South, v. 65, n. 11, p. 1132-1137, 2014.

JUHÁSZ, A. C. P.; PÁDUA, G. P.; WRUCK, D. S. M.; FAVORETO, L.; RIBEIRO, N. R. Desafios fitossanitários para a produção de soja. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 34, n. 276, p. 66-75, 2013.

JUNG, Y. G.; KANG, M. S.; HEO, J. Clustering Performance Comparison Using K-means and Expectation Maximization Algorithms. **Biotechnology and Biotechnological Equipment**, Sofia, v. 28, n. S1, p. S44-s48, 2014.

KANDEL, S. L.; SMILEY, R. W.; GARLAND-CAMPBELL, K.; ELLING, A. A.; HUGGINS, D.; PAULITZ, T. C. Spatial distribution of root lesion nematodes (*Pratylenchus* spp.) in a long-term no-till cropping system and their relationship with soil and landscape properties. **European journal of plant pathology**, Dordrecht, v. 150, n. 4, p. 1011-1021, 2018.

KRIGE, D. G. A statistical approach to some basic mine evaluation problems on the witwatersrand. **Journal of South African Institution of Mining and Metallurgy**, Johannesburg, v. 52, n. 6, p. 119-139, 1951.

LANDIS, R.; KOCH, G. G. The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. **Biometrics**, Washington, v. 33, n. 1, p. 159-174, 1977.

LAUGHLIN, C. W.; LORDELLO, L. G. E. Sistemas de manejo de nematoides: relações entre a densidade de população e os danos à planta. **Nematologia Brasileira**, Piracicaba, v. 2, n. 1, p. 15-24, 1977.

LEPSCH, I. F.; ESPÍNDOLA, C. R.; VISCHI FILHO, O. J.; HERNANI, L. C.; SIQUEIRA, D. S. **Manual para levantamento utilitário e classificação de terras no sistema de capacidade de uso**. Campinas: SBCS, 2015. 170 p.

LIMA, H. P.; ABREU, U. G. P.; OLIVEIRA, S. R. M.; MASSRUHÁ, S. M. F. S. Mineração de dados aplicada à modelagem da incidência da Anemia Infecciosa Equina (AIE), no Pantanal sul-matogrossense. In: Congresso Brasileiro de Agroinformática, 9, 2013, Cuiabá, **Anais...** Cuiabá: Universidade Federal de Mato Grosso, 2013. 6 p.

LOPES, A. P. M.; CARDOSO, M. R.; PUERARI, H. H.; FERREIRA, J. C. A.; DIAS-ARIEIRA, C. R. Manejo de *Pratylenchus brachyurus* em soja usando tratamento de sementes e indutor de resistência. **Nematropica**, Auburn, v. 47, n. 1, p. 1-7, 2017.

LUCHIARI JUNIOR, A.; BORGHI, E.; AVANZI, J. C.; FREITAS, A. A.; BORTOLON, L.; BORTOLON, E. S. O.; UMMUS, M. E.; INAMASU, R. Y. Zonas de manejo: teoria e prática. In: INAMASU, R. Y.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; BERNARDI, A. C. C. (Ed.). **Agricultura de precisão: um novo olhar**. São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2011, p. 60-64.

MACHADO, A. C. Z.; SIQUEIRA, K. M. S.; FERRAZ, L. C. C. B.; INOMOTO, M. M.; BESSI, R.; HARAKAVA, R.; OLIVEIRA, C. M. G. Characterization of Brazilian populations of *Pratylenchus brachyurus* using morphological and molecular analyses. **Tropical Plant Pathology**, Goiânia, v. 40, n. 2, p. 102-110, 2015.

MACHADO, V.; BERLITZ, D. L.; MATSUMURA, A. T. S.; SANTIN, R. C. M.; GUIMARÃES, A.; SILVA, M. E.; FIUZA, L. M. Bactérias como agentes de controle biológico de nematoides. **Oecologia Australis**, Rio de Janeiro, v. 16, n. 2, p. 165-182, 2012.

MATÉRN, B. Spatial variation. Stochastic models and their application to some problems in forest surveys and other sampling investigations. **Meddelanden fran statens Skogsforskningsinstitut**, Stockholm, v. 49, n. 5, p. 1-144, 1960.

MATHERON, G. **The theory of regionalized variables and its application**. Paris: École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 1971. 212 p. (Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau, 5).

MATO GROSSO DO SUL. Secretaria de Estado do Meio Ambiente, Planejamento, Ciência e Tecnologia. Região Leste. **Caderno geoambiental das regiões de planejamento de MS**. 2011. 402 p.

MATOS, D. S. S.; PEDROSA, E. M. R.; GUIMARÃES, L. M. P.; RODRIGUES, C. V. M. A.; BARBOSA, N. M. R. Relações entre a nematofauna e atributos químicos de solo com vinhaça. **Nematropica**, Auburn, v. 41, n. 1, p. 23-38, 2011.

MEIRA, C. A. A.; RODRIGUES, L. H. A.; MORAES, S. A. Análise da epidemia da ferrugem do cafeeiro com árvore de decisão. **Tropical Plant Pathology**, Goiânia, v. 33, n. 2, p. 114-124, 2008.

MENDES, F. L.; ANTONIO, S. F.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; DIAS, W. P. MORAES, M. T.; SILVA, J. F. V. Monitoramento de atributos químicos do solo e da ocorrência de *Pratylenchus brachyurus* em soja no Mato Grosso. In: VI Congresso Brasileiro de Soja, 6, 2012, Cuiabá. **Anais...** Londrina. Embrapa Soja, 2012. 4 p.

MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R.; COLAÇO, A. F. **Agricultura de precisão**. São Paulo: Oficina de textos, 2015. 238 p.

MUCHERINO, A.; PAPAJOJGI, P.; PARDALOS, P. M. A survey of data mining techniques Applied to agriculture. **Operational Research: An International Journal**, Athens, v. 9, n. 2, p. 121-140, 2009.

NANNI, M. R.; POVH, F. P.; DAMATTÊ, J. A. M.; OLIVEIRA, R. B.; CHICATI, M. L.; CEZAR, E. Optimum size in grid soil sampling for variable rate application in site-specific management. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 68, n. 3, p. 386-392, 2011.

NEXTGIS. QuickMap Services Plugin. Versão 0.19.11.1. 2018. Disponível em: <https://nextgis.com/blog/quickmapservices/>. Acesso em: 13 ago. 2018.

NOLLA, A.; ALVES, E. O. S.; SILVA, T. G.; BORDIN, A. V. Correção da acidez e disponibilização de fósforo e potássio em latossolo vermelho distrófico típico submetido à calagem incorporada e superficial. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, Curitiba, v. 3, n. 3, p. 2478-2487, 2020.

NOVAIS, R. F.; ALVAREZ VENEGAS, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo SBCS, 2007. 1017 p.

ODEYEMI, I. S.; AFOLAMI, S. O.; OLADIPUPO, A. J. Influence of soil properties on plant nematode population density under *Chromolaena odorata* fallow. **Journal of Agricultural Science and Environment**, Abeokuta, v. 16, n. 1, p. 105-115, 2016.

PIMENTEL, R. R. **Modelagem geoestatística de nematoides, argila e atributos químicos do solo em área irrigada no município de Paracatu-MG**. 2014. 135f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

QUEIRÓZ, C. A.; FERNANDES, C. D.; VERZIGNASSI, J. R.; VALLE, C. B.; JANK, L.; MALLMANN, G.; BATISTA, M. V. Reação de acessos e cultivares de *Brachiaria* spp. e *Panicum maximum* à *Pratylenchus brachyurus*. **Summa Phytopathologica**, Botucatu, v. 40, n. 3, p. 226-230, 2014.

QUINLAN, J. R. **C4.5**: programs for machine learning. San Mateo: Morgan Kaufmann Publishers, 1993. 302 p.

R Core Team. **R**: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. 2016. Disponível em: <https://www.R-project.org/> Acesso em: 18 nov. 2020.

RESENDE, A. V.; KRAHL, L. L.; SHIRATSUCHI, L. S.; GOEDERT, W. J.; DÖWICH, I. **Diagnóstico nutricional de uma lavoura de soja a partir de informações georreferenciadas**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2005. 30p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. Embrapa Cerrados, 145).

RODRÍGUEZ-KÁBANA, R.; COLLINS, R. J. Relation of fertilizer treatments and cropping sequence to populations of *Pratylenchus scribneri*. **Nematropica**, Auburn, v. 10, n. 2, p. 121-129, 1980.

ROKACH, L.; MAIMON, O. **Data Mining with Decision Trees**: Theory and Applications. 2ed. Singapore: World Scientific Publishing, 2014. 305p.

ROLDI, M.; DIAS-ARIEIRA, C. R.; SILVA, S. A.; DORIGO, O. F.; MACHADO, A. C. Z. Control of *Meloidogyne paranaensis* in coffee plants mediated by silicon. **Nematology**, Leiden, v. 19, n. 2, p. 245-250, 2017.

SANTOS, H. C.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa, 2018. 356p.

SANTOS, H. P.; LHAMBY, J. C. B.; SPERA, S. T. Rendimento de grãos de soja em função de diferentes sistemas de manejo de solo e de rotação de culturas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 1, p. 21-29, 2006.

SEIDEL, E. J.; OLIVEIRA, M. S. Proposta de uma generalização para os modelos de semivariogramas exponencial e gaussiano. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 34, n. 1, p. 125-132, 2013.

SFREDO, G. J. **Soja no Brasil: calagem, adubação e nutrição mineral**. Londrina: Embrapa Soja, 2008. 148p. (Embrapa Soja Documentos, n. 305).

SIDDIQUI, I. A.; SHAUKAT, S. S. Combination of *Pseudomonas aeruginosa* and *Pochonia chlamydosporia* for control of root-infecting fungi in tomato. **Journal of Phytopathology**, Berlin, v. 151, n. 4, p. 215-222, 2003.

SILVA, L. M. A.; PEDROSA, E. M. R.; VICENTE, T. F. S.; CARDOSO, M. S. O.; CASTRO, D. B.; ROLIM, M. M. Seasonal variation of plant-parasitic nematodes and relationship with nutritional and growth properties of sugarcane plantations. **Tropical Plant Pathology**, Goiânia, v. 42, n. 2, p. 132-136, 2017.

SILVA, S. A.; LIMA, J. S. S.; SOUZA, G. S.; OLIVEIRA, R. B. Avaliação de interpoladores estatísticos e determinísticos na estimativa de atributos do solo em agricultura de precisão. **Idesia**, Arica, v. 26, n. 2, p. 75-81, 2008.

SILVA, S. A.; LIMA, J. S. S.; XAVIER, A. C.; TEIXEIRA, M. M. Variabilidade espacial de atributos químicos de um latossolo vermelho-amarelo húmico cultivado com café. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 1, p. 15-22, 2010.

SILVA, S. A.; MACHADO, A. C. Z. Amostragem. In: MACHADO, A. C. Z.; SILVA, S. A.; FERRAZ, L. C. C. B. **Métodos em nematologia agrícola**. Piracicaba: Sociedade Brasileira de Nematologia, 2019. p. 1-9.

SILVEIRA, L.; KASHIWAQUI, M. M.; COSTA, B. P.; REGO, C. A. R. M.; OLIVEIRA, P. S. R.; MATTEI, E.; COSTA, A. C. T. Capacidade de uso e aptidão agrícola em pequena propriedade no município de Mundo Novo/MS. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, Curitiba, v. 6, n. 8, p. 54890-54903, 2020.

SOUZA, R.; SOUZA, E.; MACIEL NETTO, A.; ALMEIDA, A. Q.; BARROS JÚNIOR, G.; SILVA, J. R. I.; LIMA, J. R. S.; ANTONINO, A. C. D. Assessment of the physical quality of a Fluvisol in the Brazilian semiarid region. **Geoderma Regional**, Wageningen, v. 10, n. 1, p. 175-182, 2017.

SOUZA, Z. M.; CERRI, D. G. P.; COLET, M. J.; RODRIGUES, L. H. A.; MAGALHÃES, P. S. G.; MANDONI, R. J. A. Análise dos atributos do solo e da produtividade da cultura de cana-de-açúcar com o uso da geoestatística e árvore de decisão. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 4, p. 840-847, 2010.

TAN, P. N.; STEINBACH, M.; KUMAR, V. **Introdução ao Datamining: Mineração de dados**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna, 2009. 900p.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p. 1-54.

VIEIRA, S. R.; CARVALHO, J. R. P.; GONZÁLEZ, A. P. Jack knifing for semivariogram validation. **Bragantia**, Campinas, v. 69, Suplemento, p. 97-105, 2010.

VIVIANI, C. A.; MARCHETTI, M. E.; VITORINO, A. C. T.; NOVELINO, J. O.; GONÇALVES, M. C. Disponibilidade de fósforo em dois latossolos argilosos e seu acúmulo em plantas de soja, em função do aumento do pH. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 1, p. 61-67, 2010.

WALLER, L. A.; GOTWAY, C. A. **Applied spatial statistics for public health data**. Hoboken: Wiley-Interscience, 2004. 518p.

WARRICK, A. W.; NIELSEN D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Application of soils physics**. New York: Academic Press, 1980. p. 319-344.

WOJCIECHOWSKI, J. C. **Geoestatística aplicada ao estudo das características físico-químicas do solo em áreas de floresta estacional decidual**. 2006, 88f. Dissertação (Mestrado em Geomática) – Universidade Federal de Santa Maria, 2006.

WOJCIECHOWSKI, J. C.; SCHUMACHER, M. V.; PIRES, C. A. F.; MADRUGA, P. R. A.; KILCA, R. V.; BRUN, E. J.; SILVA, C. R. S.; VACCARO, S.; RONDON NETO, R. M. Geoestatística aplicada ao estudo das características físico-químicas do solo em áreas de floresta estacional decidual. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 19, n. 4, p. 383-391, 2009.

WUERTZ, D.; SETZ, T.; CHALABI, Y.; MAECHLER, M. **Package ‘fBasics’**. Rmetrics – Markets and Basic Statistics. R foundation for statistical computing. 2017. 130p.

YAMAMOTO, J. K. **Estatística, análise e interpolação de dados geoespaciais**. São Paulo: Gráfica Paulos, 2020. 308p.