

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
CAMPUS DE CASCAVEL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

GERAÇÃO DE MAPAS TEMÁTICOS PARA RECOMENDAÇÃO DE FERTILIZANTES
UTILIZANDO A PLATAFORMA AGDATABOX

FRANCILÉIA DE OLIVEIRA E SILVA

CASCAVEL – PARANÁ - BRASIL

OUTUBRO - 2022

FRANCILÉIA DE OLIVEIRA E SILVA

**GERAÇÃO DE MAPAS TEMÁTICOS PARA RECOMENDAÇÃO DE FERTILIZANTES
UTILIZANDO A PLATAFORMA AGDATABOX**

Tese apresentada ao Programa de Pós Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Agrícola, da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Doutora em Engenharia Agrícola, área de concentração em Sistemas Biológicos e Agroindustriais.

Orientador: Prof. Dr. Marcio Furlan Maggi

Coorientador: Prof. Dr. Claudio Leones Bazzi

Coorientador: Prof. Dr. Vanderlei Artur Bier

CASCADEL – PARANÁ - BRASIL

OUTUBRO – 2022

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

Silva, Franciléia de Oliveira e
GERAÇÃO DE MAPAS TEMÁTICOS PARA RECOMENDAÇÃO DE
FERTILIZANTES UTILIZANDO A PLATAFORMA AGDATABOX / Franciléia
de Oliveira e Silva; orientador Marcio Furlan Maggi;
coorientador Claudio Leones Bazzi. -- Cascavel, 2018.
143 p.

Tese (Doutorado Campus de Cascavel) -- Universidade
Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Ciências Exatas e
Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola,
2018.

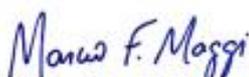
1. agricultura de precisão. 2. mapas de recomendação de
fertilizantes. 3. taxa variável. 4. zonas de manejo.. I.
Maggi, Marcio Furlan , orient. II. Bazzi, Claudio Leones,
coorient. III. Título.

Revisão de português, inglês e normas: Prof. Dra. Ana Maria Martins Alves Vasconcelos,
em 22 de Dezembro de 2022.

FRANCILÉIA DE OLIVEIRA E SILVA

GERAÇÃO DE MAPAS TEMÁTICOS PARA RECOMENDAÇÃO DE FERTILIZANTES UTILIZANDO A PLATAFORMA AGDATABOX

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Doutora em Engenharia Agrícola, área de concentração Sistemas Biológicos e Agroindustriais, linha de pesquisa Geoprocessamento, Estatística Espacial e Agricultura de Precisão, APROVADO(A) pela seguinte banca examinadora:



Orientador(a) - Marcio Furlan Maggi

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



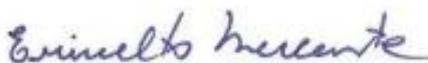
Ricardo Sobjak

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)



Humberto Martins Beneduzzi

Instituto Federal do Paraná (IFPR)



Erivelto Mercante

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Silvia Renata Machado Coelho

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

Cascavel, 03 de outubro de 2022.

BIOGRAFIA

Franciléia de Oliveira e Silva, natural da cidade de Assis Chateaubriand – PR, nascida em 24 de Outubro de 1986, graduada em Tecnologia em Análise e Desenvolvimento de Sistemas pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná em 2013. Mestre em Engenharia Agrícola na área de concentração em Sistemas Biológicos e Agroindustriais na linha de pesquisa de Geoprocessamento, Estatística Espacial e Agricultura de Precisão pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná, campus Cascavel.

“Tudo posso Naquele que me fortalece”

Filipenses 4:13

Dedico este trabalho às pessoas que tanto amo.

Aos meus pais, Jaime e Maria Dalva.

Aos meus irmãos, Faguione e Francielly.

Aos meus cunhados Marciel, Paulo e Arlete.

Aos meus sobrinhos, Gustavo, Emilly, Eduarda e Rafaela.

Aos meus sogros, Selvino e Sônia.

Às minhas enteadas, Patrícia e Andressa.

Ao meu esposo, Carlos Alberto Mucelin.

Por todo amor, apoio, incentivo de cada um de vocês.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela minha vida, pela minha saúde, por me permitir passar pela COVID-19, enquanto mais de 680 mil pessoas não tiveram a mesma oportunidade. Obrigada Pai, por me capacitar e me dar forças e coragem, para permanecer firme e superar todas as adversidades enfrentadas na realização deste trabalho. Obrigada por sempre guiar meus passos, por sempre estar ao meu lado e por colocar tantas pessoas maravilhosas em minha vida que, de forma direta ou indireta, tanto colaboraram com a realização deste trabalho.

Meus pais, Jaime Xavier da Silva e Maria Dalva de Oliveira e Silva. A vocês só gratidão, sem vocês eu não existiria. Obrigada por tudo que fizeram por mim, pelo amor, pelo exemplo de vida e pelos valores ensinados.

Meus irmãos, Francielly de Oliveira e Silva e Faguione de Oliveira e Silva, pelo apoio e infinita amizade. Meus cunhados Marciel Vieira, Paulo Mucelin e Arlete Mucelin, obrigada pelo apoio e incentivo.

Meus sobrinhos, Emilly Priscila de Oliveira Vieira e Widmeyer Gustavo Chincal e Silva, Eduarda Mucelin e Rafaela Mucelin. Obrigada por fazerem dos meus dias cinzentos, dias mais coloridos.

Meu querido esposo, Carlos Alberto Mucelin, gratidão pelo amor, apoio, incentivo amizade, paciência e cumplicidade em tudo.

Meu orientador, Marcio Furlan Maggi, pela acolhida, pela oportunidade na orientação, pelos ensinamentos, pela confiança em mim depositada, pela contribuição intelectual e exemplo de profissional.

Meus coorientadores, Claudio Leones Bazzi e Vanderlei Artur Bier, pela orientação e auxílio em todas as minhas dúvidas e dificuldades encontradas durante o desenvolvimento desta pesquisa, pela dedicação, pelos ensinamentos e atenção na execução desse trabalho.

proprietários, Sr. Wanderlei Schenatto e Aldo Tasca, pela concessão das áreas experimentais.

Professores do PGEAGRI, que participaram na construção do conhecimento e assim contribuíram para a minha formação.

UNIOESTE, através do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade dada para a minha qualificação no Mestrado.

Todos que, participaram deste trabalho e de minha formação, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

Silva, Franciléia de Oliveira e. **Geração de mapas temáticos para recomendação de fertilizantes utilizando a plataforma AgDataBox**. Orientador: Marcio Furlan Maggi; Coorientador: Claudio Leones Bazzi; Coorientador: Vanderlei Artur Bier. 2022. 143f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel – Paraná, 2022.

Mapas de recomendação de nutrientes são utilizados na aplicação de fertilizantes à taxa variável. Essa é uma das técnicas da agricultura de precisão mais utilizadas para maximizar a produtividade das principais culturas do nosso país, soja e milho. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo gerar mapas de recomendação de NPK, baseados na amostragem desses nutrientes no solo, a fim de fornecerem informações precisas para aplicação nas culturas de soja e milho, sobre a taxa variável e por zonas de manejo, utilizando a plataforma AgDataBox. Além de comparar o custo da aplicação dos fertilizantes como ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio, na agricultura convencional e na agricultura de precisão. A pesquisa foi realizada com dados obtidos em duas áreas experimentais, localizadas na região Oeste do Paraná, Brasil. A amostragem de solo foi realizada de acordo com as recomendações do manual de garantia de qualidade do Laboratório de Agricultura Mecanização Agrícola e Agricultura de Precisão. Todo processo de recomendação dos nutrientes foi realizado utilizando a plataforma AgDataBox. Deste modo, as doses para a adubação nitrogenada no milho foram obtidas pelo método de recomendação, EPMO, o qual considera a expectativa de produtividade e o teor de matéria orgânica no solo. As doses para aplicação de superfosfato simples e cloreto de potássio nas culturas de milho e soja foram obtidas pelo método D, que considera apenas o teor de cada nutriente no solo, e pelo método EP, que considera o teor do nutriente no solo e a expectativa de produtividade. Os mapas temáticos e as zonas de manejo foram gerados com base em protocolos específicos sobre o tema. Os nutrientes NPK apresentaram variabilidade espacial e temporal nas áreas estudadas. Os mapas de recomendação indicaram a variabilidade dos nutrientes nas áreas e forneceram as doses adequadas dos fertilizantes, para serem aplicadas à taxa variável. Nas duas áreas, foram identificadas zonas consideradas homogêneas, as quais apresentaram melhor divisão com duas classes. A aplicação de fertilizantes por zonas de manejo mostrou ser mais econômica do que a agricultura convencional. A plataforma AgDataBox mostrou ser eficiente ao gerar os mapas temáticos de recomendações dos fertilizantes ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio para aplicação nas culturas soja e milho à taxa variável, e na definição de zonas de manejo.

PALAVRAS-CHAVE: agricultura de precisão, mapas de recomendação de fertilizantes, taxa variável, zonas de manejo.

ABSTRACT

Silva, Franciléia de Oliveira e. **Generation of thematic maps to recommend fertilizers using the AgDataBox platform.** Advisor: Marcio Furlan Maggi; Coadvisor: Claudio Leones Bazzi; Coadvisor: Vanderlei Artur Bier. 2022. 135f. Dissertation (Doctoral in Agricultural engineering) – Western Paraná State University, Cascavel – Paraná, 2022.

The nutrients recommendation maps are used to apply fertilizers at a variable rate. This is one of the most applied precision agriculture techniques to maximize the productivity of our main crops, soybeans and corn, in Brazil. Thus, this research aimed at generating NPK recommendation maps, based on the sampling of these nutrients on soil, in order to provide accurate information to be applied in soybean and corn, at a variable rate and by management zones, using the AgDataBox platform. Besides, it also compares the cost of applying urea, simple superphosphate and potassium chloride fertilizers in conventional and precision agriculture. The research was carried out with data obtained in two experimental areas, in the Western Paraná region, Brazil. Soil sampling was carried out according to the recommendations of the quality assurance manual of the Agricultural Mechanization and Precision Agriculture Laboratory. The entire nutrient recommendation process was carried out by using the AgDataBox platform. Thus, the doses for nitrogen fertilization in corn were obtained by the recommendation method, EPMO, which considers the expectation of productivity and organic matter content in soil. The doses to apply simple superphosphate and potassium chloride in corn and soybean were obtained by the D methods, which considers only the content of each nutrient on soil, and by the EP method, which considers the nutrient content on soil and the expected productivity. Thematic maps and management zones were generated based on specific protocols on this issue. NPK nutrients showed spatial and temporal variability in the studied areas. The recommendation maps have recorded some variability of nutrients in those areas and provided adequate doses to be applied at a variable rate. Zones considered homogeneous were identified in both studied areas, which presented the best separation with two classes. The application of fertilizers at the management zones has assured to be more economical than at the conventional agriculture ones. The AgDataBox platform has shown to be efficient in generating thematic maps of recommendations for urea, simple superphosphate and potassium chloride fertilizers to be applied in soybean and corn crops at a variable rate, and in defining management zones.

KEYWORDS: precision agriculture, fertilizer recommendation maps, variable rate, management zones.

SUMÁRIO

| | |
|--|------------|
| LISTA DE TABELAS..... | xiv |
| LISTA DE FIGURAS | xvi |
| 1 INTRODUÇÃO | 17 |
| 2 OBJETIVOS | 19 |
| 2.1 Geral..... | 19 |
| 2.2 Específicos | 19 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 20 |
| 3.1 Nitrogênio | 20 |
| 3.1.1 Nitrogênio na cultura do milho..... | 22 |
| 3.1.2 Nitrogênio na cultura da soja..... | 24 |
| 3.2 Fósforo | 25 |
| 3.2.1 Fósforo na cultura do milho..... | 28 |
| 3.2.2 Fósforo na cultura da soja..... | 30 |
| 3.3 Potássio..... | 32 |
| 3.3.1 Potássio na cultura do milho | 35 |
| 3.3.2 Potássio na cultura da soja | 37 |
| 3.4 Agricultura de precisão e agricultura digital..... | 39 |
| 3.5 Aplicação de fertilizantes em taxa variável..... | 41 |
| 3.6 Mapas temáticos..... | 43 |
| 3.6.1 Criação de mapas temáticos..... | 45 |
| 3.6.1.1 Processamento dos dados..... | 46 |
| 3.6.1.2 Interpolação espacial de dados..... | 47 |
| 3.6.1.3 Criação do mapa de contorno | 49 |
| 3.7 Zonas de manejo | 52 |
| 3.7.1 Delineamento de zonas de manejo..... | 53 |
| 3.7.1.1 Processamento de dados..... | 54 |

| | |
|--|------------|
| 3.7.1.2 Normalização dos dados..... | 55 |
| 3.7.1.3 Seleção de variáveis..... | 55 |
| 3.7.1.4 Interpolação dos dados..... | 56 |
| 3.7.1.5 Agrupamento dos dados..... | 57 |
| 3.7.1.6 Retificação..... | 61 |
| 3.7.1.7 Avaliação da qualidade de zonas de manejo..... | 62 |
| 3.7.1.7.1 Comparação entre mapas temáticos e zonas de manejo..... | 64 |
| 3.8 Plataforma digital AgDataBox..... | 66 |
| 4 MATERIAL E MÉTODOS..... | 71 |
| 4.1 Áreas experimentais..... | 71 |
| 4.2. Coleta dos dados..... | 73 |
| 4.3 Mapas temáticos..... | 74 |
| 4.4 Zonas de manejo..... | 81 |
| 4.5 Comparação do custo da adubação NPK em função do sistema de manejo..... | 83 |
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 84 |
| 5.1 Processamento dos dados e da análise estatística..... | 84 |
| 5.2 Recomendação de NPK para o milho à taxa variável..... | 88 |
| 5.3 Recomendação de P e K para a soja à taxa variável..... | 93 |
| 5.4 Interpolação dos dados de recomendação de ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio..... | 95 |
| 5.5 Mapas temáticos..... | 98 |
| 5.4 Delineamento das zonas de manejo..... | 107 |
| 5.4.1 Avaliação das zonas de manejo..... | 110 |
| 5.5 Comparação entre mapas temáticos e zonas de manejo..... | 113 |
| 5.6 Recomendação de NPK por zonas de manejo..... | 115 |
| 5.5 Análise econômica..... | 122 |
| 6 CONCLUSÃO..... | 127 |
| REFERÊNCIAS..... | 128 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 Adubação fosfatada para cultivo de milho no estado do Paraná..... | 25 |
| Tabela 2 Adubação fosfatada para cultivo de milho no estado do Paraná..... | 30 |
| Tabela 3 Adubação fosfatada para cultivo de soja no estado do Paraná..... | 33 |
| Tabela 4 Adubação potássica para cultivo de milho no estado do Paraná | 38 |
| Tabela 5 Adubação potássica para cultivo de soja no estado do Paraná | 40 |
| Tabela 6 Fertilizantes disponíveis para a recomendação dos nutrientes na AgDataBox Map-AplicNutrient | 70 |
| Tabela 7 Atributos utilizados e período de coleta em cada área experimental..... | 74 |
| Tabela 8 Metodologia utilizada para cálculos das recomendações de nitrogênio (N) na cultura do milho | 77 |
| Tabela 9 Metodologia utilizada para cálculos das recomendações de fósforo (P) nas culturas soja e milho | 78 |
| Tabela 10 Metodologia utilizada para cálculos das recomendações de potássio (K) nas culturas soja e milho | 80 |
| Tabela 11 Preços dos fertilizantes ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio | 80 |
| Tabela 12 Estatística descritiva dos dados filtrados de MO, P e K disponíveis no solo | 86 |
| Tabela 13 Interpretação dos teores de matéria orgânica, fósforo e potássio disponíveis no solo nas duas áreas experimentais em seus respectivos anos agrícolas..... | 89 |
| Tabela 14 Estatística descritiva da recomendação de ureia (kg ha^{-1}) pelo método expectativa de produtividade com base no teor de matéria orgânica no solo (EPMO)..... | 91 |
| Tabela 15 Estatística descritiva da recomendação de P (superfosfato simples kg ha^{-1}) métodos EP e D..... | 92 |
| Tabela 16 Estatística descritiva da recomendação cloreto de potássio (kg ha^{-1}) pelos métodos expectativa de produtividade e disponibilidade do nutriente no solo..... | 92 |
| Tabela 17 Estatística descritiva da recomendação de superfosfato simples (kg ha^{-1}) pelos métodos expectativa de produtividade e disponibilidade do nutriente no solo..... | 93 |
| Tabela 18 Estatística descritiva da recomendação de cloreto de potássio (kg ha^{-1}) pelos métodos expectativa de produtividade e disponibilidade do nutriente no solo para a soja 4 (t ha^{-1}) | 96 |
| Tabela 19 Dados de recomendação de ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio para o milho, interpolados pelo IDP | 97 |
| Tabela 20 Dados de recomendação de superfosfato simples e cloreto de potássio para a | |

| | |
|--|-----|
| soja interpolada por IDP | 98 |
| Tabela 21 Dados de recomendação de ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio, interpolados pela Krigagem, com seus modelos e parâmetros estimados. | 99 |
| Tabela 22 Atributos utilizados e período de coleta em cada área experimental..... | 109 |
| Tabela 23 Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas..... | 110 |
| Tabela 24 Teste de Tukey e índices de avaliação para zonas de manejo | 113 |
| Tabela 25 Índice kappa e exatidão global na comparação entre os mapas temáticos e zonas de aplicação dos nutrientes ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio nas duas áreas experimentais..... | 115 |
| Tabela 26 Índice kappa e exatidão global na comparação das zonas de manejo originais com as zonas de manejo retificadas | 116 |
| Tabela 27 Recomendação de ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio para aplicação no milho por zonas de manejo na área A..... | 118 |
| Tabela 28 Recomendação de superfosfato simples e cloreto de potássio para aplicação na soja por zonas de manejo na área A..... | 119 |
| Tabela 29 Recomendação de ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio para aplicação no milho por zonas de manejo na área B..... | 121 |
| Tabela 30 Recomendação de superfosfato simples e cloreto de potássio para aplicação na soja por zonas de manejo na área B..... | 122 |
| Tabela 31 Custo da adubação NPK no milho e na soja em função do sistema de manejo (área A)..... | 123 |
| Tabela 32 Custo da adubação NPK no milho e na soja em função do sistema de manejo (área B)..... | 124 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|-----|
| Figura 1 Etapas básicas da agricultura de precisão..... | 41 |
| Figura 2 Fluxograma do protocolo típico para criar um mapa temático..... | 46 |
| Figura 3 Esquemas de cores: (a) qualitativo (b) sequencial (c) divergente..... | 51 |
| Figura 4 Fluxograma do protocolo típico para delineamento de zonas de manejo..... | 54 |
| Figura 5 Arquitetura da plataforma digital AgDataBox..... | 66 |
| Figura 6 ADB-Mobile, interface administrativa (a) e interface de demarcação do contorno da área..... | 67 |
| Figura 7 Interface do ADB-Admin..... | 67 |
| Figura 8 Representação da disposição de sensores em campo conectados com a ADB-API..... | 68 |
| Figura 9 Representação ADB-DataMining..... | 68 |
| Figura 10 Organização dos módulos que compõe a aplicação ADB-Map..... | 69 |
| Figura 11 Áreas experimentais com a distribuição dos pontos amostrais..... | 71 |
| Figura 12 Médias mensais de precipitação pluviométrica e temperatura os anos 2013, 2014 e 2015 do município de Serranópolis do Iguaçu- PR..... | 72 |
| Figura 13 Médias mensais de precipitação pluviométrica e temperatura dos anos 2015, 2016 e 2017 do município de Céu Azul-PR..... | 72 |
| Figura 14 Etapas realizadas para criação dos mapas temáticos..... | 75 |
| Figura 15 Etapas realizadas no processo de delineamento de zonas de manejo..... | 81 |
| Figura 16 Mapas temáticos de matéria orgânica, fósforo e potássio disponíveis no solo nas áreas experimentais em seus respectivos anos..... | 86 |
| Figura 17 Mapas temáticos de recomendação de ureia pelo método pelo método expectativa de produtividade com base no teor de matéria orgânica no solo (EPMO) 12 t ha ⁻¹ para o milho..... | 99 |
| Figura 18 Mapas temáticos de recomendação superfosfato simples pelo método expectativa de produtividade (EP) de 12 t ha ⁻¹ para o milho..... | 100 |
| Figura 19 Mapas temáticos de recomendação superfosfato simples pelo método disponibilidade de nutriente no solo (D) para o milho..... | 101 |
| Figura 20 Mapas temáticos de recomendação cloreto de potássio pelo método expectativa de produtividade (EP) de 12 t ha ⁻¹ para o milho..... | 102 |

| | |
|--|-----|
| Figura 21 Mapas temáticos de recomendação cloreto de potássio pelo método disponibilidade de nutriente no solo (D) para o milho..... | 103 |
| Figura 22 Mapas temáticos de recomendação superfosfato simples pelo método expectativa de produtividade (EP) de 4 t ha ⁻¹ para a soja..... | 104 |
| Figura 23 Mapas temáticos de recomendação superfosfato simples pelo método disponibilidade de nutriente no solo (D) para a soja..... | 105 |
| Figura 24 Mapas temáticos de recomendação cloreto de potássio pelo método expectativa de produtividade (EP) de 4 t ha ⁻¹ para a soja..... | 106 |
| Figura 25 Mapas temáticos de recomendação cloreto de potássio pelo método disponibilidade de nutriente no solo (D) para a soja..... | 107 |
| Figura 26 Zonas de manejo das áreas geradas com os atributos matéria orgânica, altitude, areia e resistência do solo a penetração (RSP 0-0,1) (área A) e altitude (área B)..... | 110 |
| Figura 27 Áreas A e B divididas em duas zonas de manejo..... | 115 |

1 INTRODUÇÃO

A agricultura deverá aumentar substancialmente sua produção para atender à crescente demanda de alimentos, devido à expansão da população mundial. O Brasil pode se tornar o principal fornecedor de *commodities*, principalmente de soja e milho e tem potencial para ampliar a produtividade agrícola. Contudo, ainda é preciso superar vários desafios para aumentar a produtividade das culturas, sem causar a degradação do meio ambiente. Na busca por um modelo de agricultura que permita um manejo sustentável, encontra-se a agricultura de precisão, que parte da premissa de que os recursos naturais são finitos, muitos não são renováveis, e devem ser explorados de forma eficiente, em termos de uso de insumos, de melhoria da qualidade de vida e de conservação ambiental.

Esse modelo de gestão agrícola pode ser definido como um conjunto de técnicas e procedimentos que permite realizar o manejo localizado de insumos, como fertilizantes, corretivos, pesticidas, sementes, água, com base na variabilidade espacial e temporal dos atributos do solo e das culturas, associado ao conhecimento agrônômico e histórico da área. Assim, é possível otimizar a quantidade de insumos aplicados, reduzir o custo da produção, aumentar a lucratividade e reduzir os impactos ambientais, pois a aplicação excessiva de fertilizantes pode resultar em contaminação das águas subterrâneas.

A agricultura de precisão tem como parceira a agricultura digital que reúne diversas tecnologias digitais. E, quando integradas e conectadas por softwares, sistemas e equipamentos modernos, são capazes de automatizar os processos agrícolas em todas as etapas, bem como otimizar a produção. Neste contexto, destaca-se a aplicação de fertilizantes à taxa variável, realizada com base na análise da variabilidade espacial dos nutrientes, identificada por amostragem georreferenciada de solo, nos mapas de recomendação de nutrientes, que fornecem as doses adequadas dos fertilizantes. Tais doses devem ser aplicadas em cada ponto do talhão, inseridas em softwares dos computadores embarcados em máquinas agrícolas, também equipadas com dispositivos responsáveis pela variação da dose recomendada, como sensores, controladores, atuadores, os quais são controlados por um receptor global de navegação por satélite (GNSS) de alta precisão.

Adquirir todos esses recursos requer investimento de alto custo, o que torna esta técnica menos acessível aos pequenos e médios produtores. No entanto, a aplicação a taxas variáveis em zonas de manejo representa uma alternativa mais econômica que pode viabilizar a adoção da agricultura. Esta metodologia permite utilizar os mesmos equipamentos utilizados na agricultura convencional, alterando apenas as dosagens dos

insumos na transição de uma zona para a outra, e ainda possibilita a retirada de uma única amostra composta de solo por zona, o que reduz os custos com as análises laboratoriais.

Neste cenário, as plataformas digitais voltadas para a agricultura de precisão têm contribuído na tomada de decisão para a gestão agrícola, pois fornecem subsídios aos produtores em decisões sobre o manejo de doenças, uso racional dos insumos, como agrotóxicos e fertilizantes, logo, possibilitam a redução de custos de produtividade. Como exemplo, tem-se a plataforma digital AgDataBox (ADB), uma ferramenta gratuita que disponibiliza diversos recursos aos usuários, por meio da integração de diferentes fontes de dados, softwares, procedimentos, metodologias e dispositivos, que auxiliam no aprimoramento do manejo agrícola, como na recomendação de nutrientes para as principais culturas do Brasil - soja e milho - que exigem grande quantidade de nitrogênio, fósforo e potássio para expressarem todo potencial produtivo que têm.

Os mapas de recomendação de nutrientes são imprescindíveis no processo de aplicação de fertilizantes à taxa variável, sendo esta a segunda técnica da agricultura de precisão mais adotada no Brasil, para maximizar a produtividade das culturas, lucro e agredir menos o meio ambiente. Portanto, esses mapas devem ser gerados de forma correta, com base em amostragem de solo, em manuais de adubação com recomendação específica para cada cultura e em protocolos de criação de mapas temáticos voltados à agricultura de precisão. Assim, este trabalho teve como objetivo gerar mapas de recomendação de NPK, baseados na amostragem desses nutrientes no solo, a fim de fornecer informações precisas para aplicação dos nutrientes na soja e no milho à taxa variável e por zonas de manejo, utilizando a plataforma ADB. Além disso, esta pesquisa visa comparar o custo da aplicação dos fertilizantes ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio, na agricultura convencional e na agricultura de precisão.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Comparar o custo da recomendação de fertilizantes para aplicação em modo convencional, em taxa variável e em zonas de manejo.

2.2 Específicos

- Gerar mapas de recomendação de NPK para a aplicação à taxa variável no milho e na soja;
- Definir zonas de manejo em duas áreas experimentais;
- Gerar mapas de recomendação de NPK para a aplicação por zonas de manejo no milho e na soja;
- Comparar o custo da aplicação de NPK entre a agricultura convencional e a agricultura de precisão com taxa variável em toda área e por zonas de manejo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Nitrogênio

O Nitrogênio (N) é o elemento mais abundante na natureza, presente na litosfera, hidrosfera e atmosfera. Na atmosfera, em forma de gás, compõe cerca de 78% do ar que respiramos. Apesar dessa disponibilidade, poucos seres vivos, entre eles as bactérias diazotróficas, têm a capacidade de assimilá-lo na sua forma molecular (N_2), por ser um gás estável e quase inerte, em decorrência da sua forte ligação tripla que une dois átomos. Desta forma, para que o N possa ser absorvido pelos organismos, ele precisa ser convertido em uma forma reativa (VIEIRA, 2017).

Essa conversão é realizada dentro de um ciclo chamado fixação, que pode ser físico atmosférico, biológico e industrial. A fixação atmosférica ocorre a partir de raios e descargas elétricas ou relâmpagos, que entram em contato com o N, que formam o óxido de N, e o depositam no solo por precipitações pluviométricas (TAIZ; ZEIGER, 2017). A adição no N no solo advindo desse processo é considerada baixa por depositar de 2 a 70 kg de N ha^{-1} (BRADY e WEIL, 2013). Já a fixação biológica do N é um processo que acontece por meio de alguns microrganismos, bactérias fixadoras de N, que possuem o complexo enzimático nitrogenase, responsável pela reação de catálise, em que o nitrogênio atmosférico (N_2) é reduzido até amônia (NH_3) ou íons amônio (NH_4^+), e assim fica disponível para ser utilizado pelos seres vivos (RAVEN et al., 2001).

Evans e Burris (1992) classificaram os organismos fixadores de nitrogênio em três grupos, de acordo com o modo de vida ou nutrição:

1. Fixadores não simbióticos ou de vida livre; Em vida livre, as bactérias fixam o N para uso próprio, ou seja, na manutenção de seu metabolismo, sem interação direta com outros organismos. Nesse grupo, encontram-se as bactérias autotróficas e heterotróficas, que atuam sobre as superfícies das plantas, material orgânico em decomposição e no solo. A fixação de N efetuada pelos organismos de vida livre está estimada em menos de 5 kg ha^{-1} (FREITAS e RODRIGUES, 2010).

2. Fixadores associativos: em associação com diferentes espécies vegetais, contribuem para o crescimento da planta, auxiliam a espécie hospedeira em seu desenvolvimento sem causar danos à mesma, estabelecendo uma relação positiva para ambas, sem a formação de estruturas diferenciadas, sem estabelecer simbiose. Deste modo, enquanto a bactéria fornece N para a planta, esta fornece em troca uma fonte de carbono e fotossíntese. Essa ocorrência é mais amplificada em gramíneas, como cana de

açúcar, arroz, trigo, sorgo e milho e em outras monocotiledôneas, por exemplo, em palmeiras e *Orchidaceae*. A contribuição de N fixado em associação para gramíneas está em torno de 25 a 50 kg ha⁻¹, o que equivale ao suprimento médio de 17% das demandas das culturas. Ainda considerada baixa, essa taxa de fixação biológica representa economia nos custos de produtividade agrícola, como nos adubos nitrogenados (MOREIRA, 2010).

3. Fixadores simbióticos: bactérias capazes de estabelecer simbiose com as plantas hospedeiras e formar estruturas diferenciadas, denominadas de nódulos, onde se processa a fixação biológica do N (MOREIRA, 2010). A interação dos organismos fixadores simbióticos, coletivamente chamados de rizóbios, ocorre em plantas pertencentes à família *Fabaceae*, conhecida como leguminosas. Essa interação ocorre de forma mutualística, em que a bactéria se beneficia do suprimento de fotossintatos ou carbono orgânico fornecido pela planta hospedeira. Em contrapartida, a planta recebe o nitrogênio fixado pelo rizóbio microssimbionte na forma amoniacal e o incorpora em compostos nitrogenados que podem ser translocados para suas diferentes partes, para a síntese de proteínas (CASSINI e FRANCO, 2013). Estima-se que a fixação biológica de N tenha uma contribuição global para os diferentes ecossistemas da ordem de 258 milhões de toneladas de N por ano, e a contribuição na agricultura é estimada em 60 milhões de toneladas (FIXAÇÃO, 2017).

A fixação industrial conhecida como processo de Haber Bosch foi desenvolvida na Alemanha, antes da primeira Guerra Mundial e é considerada o desenvolvimento tecnológico mais importante do século 20. Esse processo consiste em uma reação entre N e hidrogênio para obtenção de amoníaco a partir de diazoto e di-hidrogênio no estado gasoso. Para que a reação ocorra, esses elementos são submetidos a elevadas pressões (20 a 40 MPa) e elevadas temperaturas (400 °C a 650 °C) que, com auxílio de catalisador de metal, o N atmosférico é convertido em molécula de amônia (NH₃). O processo de Haber-Bosch possibilita produzir uma variedade de fertilizantes nitrogenados, além de dar suporte para a produção de alimentos no mundo pela produção de amônia, principal fonte para produção de adubos nitrogenados (TAIZ e ZEIGER, 2017).

Na agricultura, as fontes de N mais utilizadas são a ureia (46% de N), sulfato de amônio (21% de N e 23% de enxofre - S), nitrato de potássio (13% de N e 44% de K₂O), fosfato monoamônico ou MAP (10% de N e 46 a 50% de P₂O₅) e fosfato diamônico ou DAP (16% de N e 38 a 40% de P₂O₅) (EMBRAPA, 2020). Entretanto, a ureia (46% de N) é o fertilizante nitrogenado sólido mais utilizado no mundo, devido ao seu baixo custo, alta concentração de N, alta solubilidade em água e boa absorção pelas plantas (CHAGAS et. al., 2017; EMBRAPA, 2020).

A ureia é uma excelente fonte de N para atender às necessidades das plantas,

porém, pode sofrer perdas de N pelo processo de volatilização. Esse processo consiste na passagem da amônia presente no solo à atmosfera, conforme a seguinte relação: $\text{NH}_4^+ + \text{OH}^- \text{ (aquoso)} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{NH}_3 \text{ (gás)}$ (DIEST, 1988). Outra forma importante de perda de N ocorre por lixiviação, quando há um processo de deslocamento de minerais presentes na superfície do solo, sendo transportados para camadas mais profundas da terra. Além de prejuízos econômicos, as perdas de N por lixiviação podem resultar na contaminação de águas superficiais e subterrâneas, tornando-se um problema de poluição ambiental e de saúde pública. Diante desses aspectos, são necessários manejo correto e conhecimento quanto às transformações desse elemento nos ambientes agrícolas.

3.1.1 Nitrogênio na cultura do milho

Presente na maioria dos compostos orgânicos, como aminoácidos, amidas, proteínas, ácidos nucleicos (DNA e RNA), hormônios, clorofila e outros compostos, o N é essencial à vida das plantas (MALAVOLTA, 2008; TAIZ e ZEIGER, 2017). Participa das principais reações químicas e atua no crescimento da vegetação, na formação de botões florais, rendimento dos grãos e na qualidade dos produtos vegetais. Por estar localizado principalmente nos cloroplastos das folhas, interfere diretamente na atividade fotossintética e proporciona maior produção de amido e de outros carboidratos indispensáveis para a formação e o desenvolvimento das plantas (TAIZ e ZEIGER, 2017).

O N é um dos nutrientes absorvidos em maior quantidade pela cultura do milho, com exigência média de 23,8 kg de N para cada tonelada de grãos. Também é o elemento que causa maiores efeitos no aumento da produtividade desta cultura, pois afeta várias características que influenciam a produtividade final (DUETE et al., 2008). Em geral, 70 a 90% dos experimentos com milho executados em campo no Brasil responderam à aplicação de nitrogênio (CANTARELLA e RAIJ, 1986; LANTMANN et al., 1986).

Mesmo em solo fértil, as plantas de milho respondem à aplicação de N. Assim, há a interferência em suas diversas características, relacionadas ao crescimento e ao desenvolvimento como massa de mil grãos, número de espigas por planta, altura de plantas, peso, comprimento de espiga, densidades populacionais, diâmetro do colmo, produção de matéria seca, teor de clorofila e produtividade (LACERDA et al., 2015; ARAÚJO et al., 2016).

Valderrama et al. (2011) cultivaram o milho e verificaram o aumento sobre a espiga e na produtividade de grãos do milho de segunda safra. Zoz et al. (2018)

avaliaram a aplicação de N em semeadura na cultura do milho de segunda safra, cultivado em sistema de semeadura direta e verificaram que a adubação nitrogenada na dose de 65 kg ha⁻¹ influenciou o número de grãos/espiga, o número de fileiras/espiga, a massa de grãos/espiga, a massa de 100 grãos, o comprimento de espiga e a produtividade.

Meneghini et al. (2020) compararam a aplicação de sulfato de amônio e ureia em diferentes doses no milho de segunda safra, e verificaram que o diâmetro do colmo, a produtividade e a massa de mil grãos foram maiores com a adubação nitrogenada. Segundo Fancelli e Dourado Neto (2000), o crescimento do colmo das plantas de milho acontece a partir da emissão da oitava folha e se estende até a fase de florescimento. Além de atuar como suporte de folhas e inflorescências, o colmo também atua como estrutura de armazenamento de fotoassimilados que contribuem na fase de formação e enchimento de grãos. Sendo assim, quanto maior for o diâmetro do colmo maior será a capacidade da planta em armazenar os sólidos solúveis fundamentais na obtenção de altas produtividades (KAPPES et al., 2014).

A altura das plantas é um fator de grande importância a ser considerado, pois além de produzirem maior quantidade de massa fresca, há maior acúmulo de nutrientes, os quais, no período reprodutivo, são todos translocados para os grãos das espigas, o que pode influenciar diretamente na produtividade final da cultura (PARIZ et al., 2011).

Vários outros estudos relatam o efeito positivo do N nas características da cultura do milho: aumento da massa de mil grãos (GOES et al., 2013; MOTA et al., 2015; ARAÚJO et al., 2016; MENEGHINI et al., 2020), número de espigas por planta (FERREIRA et al., 2001; SORATTO et al., 2010; ARAÚJO et al., 2016), altura de plantas (KAPPES et al., 2014; TORRES et al., 2014; ARAÚJO et al., 2016) peso de espigas (FERREIRA et al., 2001; MAJEROWICZ et al., 2002; SCHIAVINATTI et al., 2011; ARAÚJO et al., 2016), comprimento de espiga (ARAÚJO et al., 2016), teor de clorofila (ARAÚJO et al., 2016); densidades populacionais (FOLONI et al., 2014; TAKASU et al., 2014; LANA et al., 2014; SILVA et al., 2014) diâmetro do colmo (SORATTO et al., 2010; SCHIAVINATTI et al., 2011; KAPPES et al., 2014; MENEGHINI et al., 2020); produção de matéria seca (DUETE et al., 2008; ARAÚJO et al., 2016) e produtividade (MELO et al., 2011; KAPPES et al., 2014; MENEGHINI et al., 2020).

As exigências de N, pelo milho, variam com os diferentes estádios de desenvolvimento da planta. Elas são mínimas nos estádios iniciais, aumentam com a elevação da taxa de crescimento e alcançam um pico do estágio de florescimento até o início da formação dos grãos (OKUMURA et al., 2012). Nos estádios fenológicos de seis folhas expandidas ao pendoamento, o milho absorve mais esse nutriente, cerca de 70% (COELHO, 2016).

Quantidades adequadas de N propiciam o crescimento vegetativo e estão relacionadas à resposta positiva dos componentes de produção como massa, grãos e comprimento da espiga (FERREIRA et al., 2010). A deficiência desse nutriente provoca sintomas como clorose total, seguida de necrose, devido à menor produção de clorofila. Quando a planta é deficiente em N, a relação carboidratos solúveis/proteína é maior, pois há falta de N para a síntese de proteína (SFREDO, 2008). Já plantas em excesso de N apresentam maior abundância de aminoácidos livres, por conseguinte, estas moléculas de baixo peso molecular predispõem a planta a ataques de agentes patogênicos, pois são de fácil assimilação por tais organismos (YAMADA, 2004; PRADO, 2008). Melo et al. (2011) ainda afirmam que a aplicação de doses muito elevadas de N causam um consumo de luxo pela planta, pois a mesma aumenta a concentração de N na parte aérea e diminui o rendimento de grãos.

A adubação nitrogenada para a cultura do milho é recomendada pela perspectiva de produtividade, baseada no cultivo anterior (Tabela 1). Para o estado do Paraná, Pauletti e Motta (2017) recomendam a aplicação de 30 a 50 (kg ha⁻¹) de nitrogênio na semeadura e o restante em cobertura, quando as plantas estiverem entre os estágios vegetativos V2 e V6. Em solos argilosos, a dose deve ser parcelada caso seja superior a 120 Kg ha⁻¹.

Tabela 1 Adubação fosfatada para cultivo de milho no estado do Paraná

| Cultura anterior ¹ | Produtividade esperada de grãos (t ha ⁻¹) | | | |
|-------------------------------|---|---------|---------|---------|
| | <8 | 8-12 | 13-16 | >16 |
| | N (Kg ha ⁻¹) | | | |
| Gramínea | 80-120 | 121-180 | 181-260 | 261-340 |
| Leguminosa | 20-60 | 61-120 | 121-200 | 201-280 |

Nota: ¹Cultura anterior com produção de matéria seca superior a 2 (t ha⁻¹)

Fonte: Pauletti e Motta (2017).

3.1.2 Nitrogênio na cultura da soja

Na soja, o nitrogênio é o nutriente exigido em maior quantidade devido à sua qualidade nutricional, rica em proteína (40 %) e óleo (20 %) (BOERMA e SPECHT, 2004). Do total exigido, 84% são destinados aos grãos, o restante é alocado nas folhas, caule e raízes (HUNGRIA et al., 2001). Estima-se que para cada tonelada de grãos produzidos, sejam necessários cerca de 80 kg de N, sendo que 51 g kg⁻¹ são destinados para os grãos e 32 g kg⁻¹ nos restos culturais. Para a produção de 4.000 kg ha⁻¹, há a necessidade de 250 a 280 kg de nitrogênio, que chega a acumular de 250 a 280 kg de N ha⁻¹, desses 67 a 75% são alocados nos grãos (HUNGRIA, 2007; KINUGASA et al., 2012; SATURNO et al., 2017).

A soja tem a capacidade de obter nitrogênio pela fixação biológica de nitrogênio com as bactérias do gênero *Bradyrhizobium*. Essas bactérias se associam às plantas e formam nódulos esféricos, nos quais ocorre o processo de fixação, resultando na conversão do nitrogênio atmosférico (N₂) em amônia (NH₃) disponível para a planta, intermediado pela enzima dinitrogenase (EMBRAPA, 2013). De modo geral, do total de nitrogênio absorvido pelas plantas, 10% são adquiridos pela fixação não biológica, 25% são provenientes da produção industrial, e 65% vêm da fixação biológica de nitrogênio, considerada a maior provedora deste nutriente na Terra (HUNGRIA et al., 2007).

Estudos com fixação biológica de nitrogênio em leguminosas iniciaram nos anos de 1950. Desde então, a técnica de inoculação é utilizada para o suprimento de quase todo nitrogênio demandado pela cultura da soja (BELTRAME, 2010). A inoculação consiste em adicionar às sementes estirpes de *Bradyrhizobium*, selecionadas pela pesquisa, capazes de estabelecer simbioses e suprir a demanda da planta pelo nitrogênio, além de liberá-lo para a cultura subsequente (HUNGRIA et al., 2007).

Desta forma, tem sido recomendada e realizada a semeadura da soja no Brasil, sem o uso de fertilizantes nitrogenados, substituídos pela fixação biológica de nitrogênio. Porém, não há um consenso na literatura sobre a necessidade ou não de aplicação de fertilizantes. Muitos autores encontraram resposta negativa da aplicação de N na produção da soja, além de não haver incremento na produtividade dos grãos (ALVES, BODDEY e URQUIAGA, 2003; KASCHUK et al., 2016; SATURNO et al., 2017).

3.2 Fósforo

Em 1699, o químico alemão Henning Brandt descobriu o fósforo (P), submeteu uma mistura de urina humana e areia a um processo de destilação, na tentativa de produzir ouro. No entanto, o material que ele obteve foi uma substância inflamável branca que brilhava no escuro, que ele nomeou de *Phosphoros*, de origem grega que significa “portador de luz” (ASHLEY et al., 2011). O fósforo é um elemento químico ametal, que não se encontra livre na natureza, por ser muito reativo, mas é encontrado na forma de compostos de ferro, alumínio e de cálcio, em rochas de origens sedimentares, ígneas, e biogenéticas. As rochas sedimentares correspondem em cerca de 85% da oferta mundial, seguida pelas rochas ígneas com 15% e a biogenéticas com 1%. Os depósitos de origem sedimentar e ígnea são os mais importantes do ponto de vista econômico (FERNANDES; 2006; EPSTEIN e BLOOM, 2006).

As maiores reservas de fósforo são encontradas nas jazidas em Marrocos e Saara Ocidental que correspondem a 80% das reservas mundiais, e a China ocupa o segundo

lugar com 5% seguida pela Argélia com 3,5 (USGS, 2017). O Brasil está na décima segunda com 320 milhões de toneladas, o que representa 0,5% do total global. Das reservas brasileiras de fosfato, 80% são de origem ígnea com presença acentuada de rocha carbonatítica e minerais micáceos com baixo teor de P_2O_5 variando entre 4% e 15%, porém, em termos mundiais, encontra-se o teor médio de 17% (USGS, 2018).

As rochas fosfáticas, também conhecidas como fosfatos naturais, são classificadas em três grupos de acordo com sua composição mineral: a) fosfato de ferro-alumínio; b) fosfato de cálcio-ferro-alumínio e c) fosfatos de cálcio (LEHR, 1964; KAMINSKI e PERUZZO, 1997). Esses três grupos podem ocorrer em uma sequência natural de intemperismo, onde os fosfatos de ferro-alumínio representam o estágio mais avançado de intemperismo e o fosfato de cálcio representa a rocha matriz (RAIJ, 2001).

As apatitas constituem uma vasta família de minerais de fosfatos de cálcio que apresentam teores entre 5 a 15% de P_2O_5 e após o beneficiamento apresentam teores que variam de 32% a 38% de P_2O_5 (LOUREIRO, MONTE, NASCIMENTO, 2005; LEGEROS, BEN-NISSAN, 2014). As apatitas brasileiras, em sua maioria, são constituídas por uma mistura de fluorapatita e hidroxiapatita (ELLIOTT, 2013). A rocha fosfática é utilizada principalmente na fabricação de fertilizantes, mas também é essencial na produção de diversos produtos de limpeza, bebidas, alimentos e na nutrição animal (IBRAM, 2012). No Brasil, a principal matéria prima para produção de fertilizantes fosfatados são os minerais de apatita. Esses são classificados em fontes solúveis, pouco solúveis e insolúveis (KORNDORFER, 2005).

As fontes solúveis, quando adicionadas ao solo, aumentam rapidamente a concentração do fósforo na solução do solo. Para ser transformado em uma forma disponível para as plantas, o fosfato inorgânico sofre uma série de reações no solo que tendem ao equilíbrio entre as fases sólida e líquida do solo. A maior parte é adsorvida na fase sólida, formando compostos de solubilidade. Contudo, a eficiência dessas fontes é diminuída ao longo do tempo devido ao processo de adsorção ou fixação do fósforo (UEHARA e GILLMAN, 1981; MALAVOLTA, 2006).

As fontes insolúveis, como é o caso dos fosfatos naturais, se dissolvem na solução do solo e tendem a aumentar a disponibilidade do fósforo para as plantas com o tempo (KORNDORFER et al., 2005). O fósforo insolúvel necessita de atividade microbiana para convertê-lo em fósforo inorgânico, forma disponível para as plantas. Logo os fosfatos naturais são fertilizantes que apresentam baixa disponibilidade de fósforo para as plantas no curto prazo. No entanto, seu uso tem papel fundamental para a vida de microrganismos, aumentando a capacidade de troca catiônica (CTC) e a mobilidade de fósforo no solo (NOVAIS e SMYTH, 1999).

A escolha da fonte fosfatada deve ser baseada na eficiência do nutriente para as

plantas bem como o custo benefício. Em decorrência do custo elevado dos fertilizantes fosfatados solúveis e do aumento da oferta de fosfatos naturais de melhor eficiência agronômica, o uso de fontes alternativas de fósforo tem adquirido grande importância (NOVAIS et al., 2007).

As fontes fosfatadas solúveis mais produzidas são os superfosfatos simples (SSP), triplo (STP), ácido fosfórico, termosfosfato e os fosfatos de amônia: monofosfato de amônio (MAP) e difosfato de amônio (DAP) (KORNDORFER, 2005). A diferença desses fertilizantes consiste na forma de como são produzidos, no que é adicionado no momento da produção, na concentração de fósforo e na sua reatividade (RAIJ, 2001). A eficiência agronômica dos adubos fosfatados pode ser afetada pelas fontes de fosfato, propriedades do solo, modos de aplicação e espécies vegetais (CHIEN e MENON, 1995).

No solo, o fósforo encontra-se na forma lábil e corresponde ao fósforo adsorvido à superfície dos minerais de argila, hidróxidos, carbonatos, apatitas, bem como fosfatos de Fe e Al. As plantas o absorvem da solução do solo na forma de ânion ortofosfato, mono ou diácido (HPO_4^{2-} , H_2PO_4) (TAIZ e ZEIGER, 2013).

A baixa disponibilidade de fósforo no solo pode afetar os principais componentes de rendimento das culturas. Pois, ele possui diversas funções no metabolismo das plantas, participa da fotossíntese, respiração, no metabolismo de açúcares, na divisão celular e no crescimento das células. O fósforo também está presente no código genético (DNA e RNA), que constitui a adenosina trifosfato (ATP), molécula responsável pela conversão e transferência de energia para uma célula. Além de atuar na absorção de água e dos demais nutrientes do solo (TAIZ e ZEIGER, 2013).

Dentre todas as funções do fósforo, a principal é a de armazenar e transferir energia na planta e demais seres vivos. Desta forma, o fósforo participa de todos os processos que envolvem gasto de energia, desde a absorção de nutrientes até a formação de órgãos na planta (MALAVOLTA et al., 2006).

A deficiência de fósforo no solo causa distúrbios severos no metabolismo e desenvolvimento das plantas, afeta fotossíntese, absorção de água, de nutrientes e compromete a produtividade da cultura (CORTEZ, 2011). Quando este nutriente é deficiente logo no início do ciclo vegetativo, podem resultar em restrições no crescimento, das quais a planta não se recupera posteriormente, mesmo com o aumento do suprimento de P em níveis adequados. Ele pode restringir o crescimento e o desenvolvimento da raiz, e diminuir a síntese de ácidos nucleicos e de proteína, além de diminuir o crescimento da célula, retardá-lo ou até paralisá-lo (ROTILI et al., 2015; GRANT et al., 2001). Desse modo, o suprimento adequado de P é essencial desde os estádios iniciais de crescimento da planta (ALMEIDA JÚNIOR et al., 2009).

Nas plantas, a deficiência de fósforo apresenta-se inicialmente nas folhas mais

velhas. Se a respiração reduzir mais que a fotossíntese, os carboidratos se acumulam, deixam as folhas com coloração verde-escura que, com o tempo, apresentam clorose generalizada (GRANT et al., 2001). Os sintomas são agravados nos estádios de floração e enchimento dos grãos. Em condições de deficiência severa, as plantas tornam-se enfezadas. Os resultados dos sintomas de deficiência de fósforo incluem diminuição na altura da planta, atraso na emergência das folhas e redução na brotação e desenvolvimento de raízes secundárias, na produção de matéria seca e na produtividade. Já os sintomas de excesso aparecem, principalmente, na forma de deficiência de micronutrientes, como ferro, zinco e cobre (EPSTEIN e BLOOM, 2006).

3.2.1 Fósforo na cultura do milho

O fósforo é menos exigido na cultura do milho, quando comparado com nitrogênio e potássio (CASTRO et al., 2016). Estima-se que a cultura extraia cerca de 10 kg de P para cada tonelada de grão produzida (RESENDE, 2004; COELHO e ALVES, 2004). No entanto, devido à alta capacidade de adsorção de fósforo nos solos argilosos, altas doses desse nutriente devem ser fornecidas nas adubações, para obter elevada produtividade (COELHO e ALVES, 2004).

A deficiência de P nas plantas de milho provoca a redução do surgimento e crescimento de folhas, especialmente as folhas baixas, além de menor captação dos raios solares e diminuição da produção de carboidratos, o que afeta o desenvolvimento de raízes nodais e absorção da planta (GRANT et al., 2001). Taiz e Zeiger (2004) relataram que plantas submetidas à deficiência de fósforo, principalmente, quando jovens, têm crescimento reduzido, conseqüentemente, há o comprometimento da produção.

Os sintomas de deficiência de fósforo manifestam-se já nos primeiros estádios de desenvolvimento. O sintoma inicial é a coloração verde-escura com tons roxos nas pontas e margens das folhas. A coloração arroxeada pode evoluir para necrose com início na ponta das folhas que segue depois para a base. Os colmos também ficam frágeis, delgados e improdutivo, com espigas pequenas, mal formadas, tortas e com falhas nas fileiras de grãos, além de maturidade retardada e desuniforme (NOVAIS, 2007).

Saldanha et al. (2017) asseguram que características como altura da planta, diâmetro do colmo, número de folhas por planta, número de espigas por planta, matéria seca da planta e produtividade de grãos apresentaram respostas positivas e significativas à aplicação de P no sulco de semeadura. O número de folhas e a área foliar na planta de

milho têm sido reportados na literatura (MAGALHÃES et al., 1995; ALVIM et al., 2010) como variáveis de influência direta na produtividade de grãos em respostas à disponibilidade de nutrientes.

Tiritan et al. (2010) avaliaram efeitos da adubação fosfatada na cultura do milho, utilizando fontes de fósforo mineral e organomineral, concluíram que a utilização de fertilizantes organominerais é uma ótima estratégia para elevar a produtividade agrícola e reduzir os custos de adubação na cultura do milho. Freitas e Antunes (2018) avaliaram o peso de grãos e o tamanho de espigas na cultura do milho, utilizando adubação química e organomineral. Os autores verificaram que as duas opções se mostraram excelentes fontes nutricionais para o alto rendimento produtivo do milho.

Fernandes et al. (2020) avaliaram o uso dos fertilizantes fosfatados organominerais na produção, qualidade e crescimento pós-colheita da alface, e seu efeito residual na cultura do milho plantado em sucessão. Assim, concluíram que os fertilizantes organominerais proporcionaram efeitos positivos para a produção das plantas de alface e para o milho plantado em sucessão, se mostrando como uma boa alternativa ao uso dos fertilizantes minerais devido ao seu efeito residual no solo.

Fidelis et al. (2009) empregaram maior nível de fósforo e observaram que houve incremento na altura das plantas em relação ao ambiente com menor nível de fósforo. Assim como Bastos et al. (2010) que verificaram o efeito de doses recomendadas de P em função da capacidade máxima de adsorção de fósforo na cultura do milho e observaram que o aumento da dose de fósforo no solo promoveu incremento na concentração do elemento na parte aérea.

Saldanha et al. (2017) analisaram as variáveis: altura da planta, diâmetro do colmo, número de folhas por planta, número de espigas por planta, matéria seca da planta e produtividade de grãos para a variedade de milho BR 5102, em Latossolo Amarelo distrófico típico, no município de Capitão Poço, e apresentaram respostas positivas e significativas à aplicação de fósforo no sulco de semeadura. A aplicação de 179,87 kg ha⁻¹ de fósforo (P₂O₅) na cultura do milho proporcionou a produtividade de 6,58 t ha⁻¹ de grãos.

Valderrama et al. (2011) constataram que o aumento das doses de P, aplicadas ao solo (0,0, 50, 100 e 150 kg ha⁻¹ de P₂O₅), influenciaram significativamente o teor de P foliar, ajustando-se à equação quadrática, com o ponto de máxima sendo alcançado com a estimativa de aplicação de 127 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Prado et al., (2001) trabalharam com doses (0,0, 45,0, 67,5, 90,0, 112,5, e 135,0 kg ha⁻¹ de P₂O₅) e modos de aplicação de P no milho, e também observaram efeito positivo para os teores de P foliar.

As principais tabelas de recomendação de adubação em uso no país recomendam doses de P₂O₅ para a cultura do milho de acordo com o teor de P no solo,

com a produtividade esperada da cultura, com o tipo de solo e com a tabela de recomendação de adubação. Assim como Pauletti e Motta (2017) que recomendam para o estado do Paraná, teores de fósforo, conforme a Tabela (2).

Tabela 2 Adubação fosfatada para cultivo de milho no estado do Paraná

| P no solo | Produtividade de grãos esperada (t ha ⁻¹) | | | |
|-------------------|---|----------|----------|----------|
| | <8 | 8-12 | 13-16 | >16 |
| | P ₂ O ₅ (Kg ha ⁻¹) | | | |
| Muito baixo | 110-130 | Inviável | Inviável | Inviável |
| Baixo | 90-110 | 111-130 | 131-150 | Inviável |
| Médio | 70-90 | 91-110 | 111-130 | 131-150 |
| Alto | 50-70 | 71-90 | 91-110 | 111-130 |
| Muito alto | 30-50 | 51-70 | 71-90 | 91-110 |
| Condição a evitar | 0 | 0 | 0 | 0 |

Fonte: Pauletti e Motta (2017).

3.2.2 Fósforo na cultura da soja

A extração desse nutriente pela soja é relativamente lenta. Segundo Rosolem (1982), a época em que o fósforo é absorvido em maior quantidade ocorre até os 52 dias após a emergência, entre os estádios V4 a R6, com a absorção de 0,2 a 0,4kg ha⁻¹ dia, sendo que, do total absorvido, 60% da exigência ocorre após o florescimento (R1). Assim, a cultura da soja necessita de um bom suprimento desse nutriente em quase todo seu ciclo (PROCHNOW et al., 2010). Estima-se que para cada 1000 kg de grãos de soja sejam necessários cerca de 15 kg de P₂O₅, dos quais 10 g kg⁻¹ são acumulados nos grãos e 5,4 g kg⁻¹ nos restos culturais (EMBRAPA, 2013).

Diversos estudos relatam efeito positivo do fósforo nas características da cultura da soja. Valadão Junior et al. (2008) observaram aumento na altura de plantas de soja, este resultado foi obtido com dose de 140 kg/ha⁻¹. Rosa et al. (2015), ao analisarem doses e métodos de aplicação de fósforo na cultura da soja, obtiveram resultados diferentes para altura de plantas. E, na testemunha, a menor altura de plantas foi de 54 cm e com a maior dose (200 Kg/ha⁻¹), a maior altura foi 64,7 cm no método de aplicação a lanço na área.

Paula (2016), em avaliação da resposta de genótipos de soja em dois níveis de fósforo (alto e baixo), verificou interação entre os genótipos e os níveis de P. Todavia, o baixo teor de P no solo reduziu o número de nós para a maioria dos genótipos. Alves (2018), ao testar diferentes níveis de P, em diversos genótipos de soja, constatou que o teor de P no solo influenciou o número de nós da planta tanto no florescimento quanto na maturação, de modo que as menores médias para essas variáveis foram observadas nas menores doses de P₂O₅.

Moterle et al. (2009) observaram que a massa de sementes foi o componente que mais contribuiu para o incremento de produtividade cultura da soja. Olibone e Rosolem (2010) constataram aumento na concentração de P em sementes de soja com adubação fosfatada de até 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Já Batistella Filho et al. (2013) verificaram aumento linear com as concentrações de P, tanto na folha quanto nas sementes, no experimento conduzido por Guerra et al. (2006a), com doses de superfosfato triplo que variaram de 0 a 400 kg ha⁻¹. Os autores observaram aumento de germinação e vigor das sementes conforme aumentava a dose de fósforo.

Resultado semelhante foi obtido por Marin et al. (2015), os autores constataram que a adubação fosfatada na base gerou sementes de soja com maior vigor à medida que essa adubação foi crescente. Dados que refletiram positivamente na concentração de P, Zn e Fe nas sementes e no aumento de produtividade de grãos. Em estudo com adubação fosfatada e potássica em soja, Moterle et al. (2009) observaram que a massa de mil sementes foi o fator que mais incrementou a produtividade da cultura.

Já Gonçalves Júnior et al. (2010) observaram que o dobro da dose recomendada de P, com base na interpretação da análise de solo, resultou em incremento de 29% no número de vagens produzidas e 20% na produtividade. Em experimento com a análise do efeito da adubação com P, K e Zn em soja, Gonçalves Júnior et al. (2010) constataram que a adubação fosfatada e potássica contribuiu com o aumento da produtividade da cultura, em função do maior número de vagens por planta.

Guareschi et al. (2011) testaram diferentes doses de P em cobertura e na linha de semeadura. Os autores também constataram maior produtividade da cultura da soja quando o fertilizante foi aplicado no momento da semeadura, do que com aplicação a lanço em cobertura. Resultados semelhantes foram constatados por Batistella Filho et al. (2013), cuja a quantidade de fósforo na linha de semeadura da soja variou entre 0 e 160 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Leite et al. (2017) constataram que doses crescentes de fósforo influenciaram positivamente a produtividade de grãos. Os autores também verificaram ainda que em períodos de déficit hídrico, apenas a altura de plantas é responsiva às doses de P. Batistella Filho (2013) constatou que o incremento deste nutriente foi favorável à produtividade de sementes. Por conseguinte, um bom suprimento de fósforo na cultura da soja promove incrementos significativos na produtividade (ARAÚJO et al., 2005).

Assim Pauletti e Motta (2017) recomendam teores de fósforo de acordo com a classificação do nutriente no solo para o estado do Paraná, e pela perspectiva de produtividade esperada, para uma adubação adequada para a cultura da soja, conforme a Tabela (3).

Tabela 3 Adubação fosfatada para cultivo de soja no estado do Paraná

| P no solo | Produtividade de grãos esperada (t ha ⁻¹) | | | |
|--|---|---------|----------|----------|
| | <3 | 3-4 | 4,1-5 | >5 |
| P ₂ O ₅ (Kg ha ⁻¹) | | | | |
| Muito baixo | 81-100 | 101-120 | Inviável | Inviável |
| Baixo | 61-80 | 81-100 | 101-120 | Inviável |
| Médio | 41-60 | 61-80 | 81-100 | 101-120 |
| Alto | 20-40 | 41-60 | 61-80 | 81-100 |
| Muito alto | 0 | 20-40 | 41-60 | 61-80 |
| Condição a evitar | 0 | 0 | 0 | 0 |

Fonte: Pauletti e Motta (2017).

3.3 Potássio

O Potássio foi isolado pela primeira vez pelo químico inglês Humphry Davy em 1807 através de eletrólise. No inglês, *potash* significa pote de cinza. Este termo resulta do processo primitivo realizado desde o século III a.C para obter o potássio através da queima de árvores, quando as cinzas eram recolhidas em potes de metal, passavam por lixiviação seguida de evaporação e assim o produto residual era então utilizado como fertilizante (NASCIMENTO et. al., 2008; IPI, 2012).

Esse elemento químico pertence à classe dos metais alcalino, é leve, se funde a baixas temperaturas e tem coloração branco-prateada. É abundante na crosta terrestre, mas devido a sua alta reatividade, só ocorre na forma de compostos, encontrados em rochas (ígneas, sedimentares e metamórficas), solos, oceanos, lagos e salinas residuais de lagos salgados (NASCIMENTO e LOUREIRO, 2004).

Existem diversos compostos portadores de potássio, no entanto, os compostos de potássio de maior interesse econômico são os chamados minerais derivados de depósitos evaporíticos (NASCIMENTO e LOUREIRO, 2004), os quais apresentam elevados teores de potássio, são muito solúveis em água e podem ser processados e explorados com maior facilidade. Os principais minerais evaporíticos de potássio são: silvita (KCl), contendo 63% de K₂O; carnalita (KCl.MgCl₂.6H₂O), contendo 17% de K₂O; cainita (KCl.MgSO₄.3H₂O), contendo 19% de K₂O; e langbeinita (K₂SO₄. 2MgSO₄), contendo 23% de K₂O, polialita (K₂SO₄.MgSO₄.2CaSO₄.2H₂O), contendo 15,6% de K₂O; schoenita (K₂SO₄.MgSO₄.6H₂O), contendo 23,4% de K₂O; singernita (K₂SO₄.CaSO₄.H₂O), contendo 28% de K₂O.

Em virtude do elevado teor de potássio, o mineral mais importante da lista acima é a silvita, embora a carnalita, a cainita e a langbeinita sejam também exploradas comercialmente como fonte de potássio. Nos depósitos evaporíticos ocorre, frequentemente, a mistura silvita e halita, denominada de silvinita (KCl + NaCl), constituindo-se no principal minério de potássio (DNPM, 2015).

Em termos mundiais, mais de 95% da produção de potássio é usada como fertilizante na agricultura, e 90% dessa produção é usada na forma de cloreto de potássio. O restante é consumido pela indústria química, na fabricação de vidros, sabão, detergente, entre outros. O cloreto de potássio é vendido como um produto contendo de (60 a 62% de K_2O). O sulfato de potássio (50 a 52% de K_2O), o sulfato duplo de potássio e magnésio (22 % de K_2O) e o nitrato de potássio (44 % de K_2O) também são usados na agricultura como fonte de potássio, no entanto, são utilizados em menor proporção e em culturas específicas (IBRAM, 2012; DNPM, 2012).

As reservas de potássio no Brasil são estimadas em 16 bilhões de toneladas, distribuídas nas regiões Norte e Nordeste, concentradas no estado de Sergipe e Amazonas. Em Sergipe, a reserva de potássio é estimada em 14.400 milhões de toneladas de carnalita e 482,6 milhões de toneladas de silvinita, com teores médios entre 8,31 % e 10,40 % de K_2O , respectivamente. Esses depósitos encontram-se nos municípios de Carmópolis, Santa Rosa de Lima e Rosário do Catete, em sub-bacias evaporíticas de Taquari-Vassouras e Santa Rosa de Lima, e também nos municípios de Japaratuba e Capela. No estado do Amazonas, a reserva estimada de potássio é de aproximadamente, 1.008,1 milhões de toneladas de silvinita, com teor médio de 18,47 % de K_2O equivalente. Esses depósitos encontram-se no município de Nova Olinda do Norte (DNPM, 2015).

Destas reservas, somente a de Taquari-Vassouras, explorada pela Vale, está em operação desde 1985. Essa reserva atende menos de 10% da necessidade de sais de potássio do país. Devido à pequena produção interna, comparada à demanda interna pelo produto, o Brasil situa-se, no contexto mundial, como grande importador de potássio, tendo como principais fornecedores, o Canadá, Bielorrússia e a Rússia. Estes países estão no cenário mundial, como os principais, em termos de reserva e produção de sais de potássio (DNPM, 2015; U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2017).

O Brasil vem se tornando um dos maiores consumidores de fertilizantes, devido à tendência de aumento do uso, que está diretamente relacionado com o crescimento da produção agropecuária no país. Após o nitrogênio (N), o K é o nutriente requerido em maiores quantidades pelas culturas. Entretanto, diferente do N, que pode ser disponibilizado por processos de fixação biológica, não existem fontes renováveis de K, de modo que sua disponibilidade às plantas depende essencialmente das reservas do solo e da aplicação de fertilizantes para torná-los sustentáveis (SILVA e LAZARINI, 2014).

Apesar de a maioria dos solos conterem milhares de quilos de potássio, somente uma pequena parcela, cerca de 1 a 2% desse potássio, está disponível para as plantas nas formas trocável ou solúvel (NASCIMENTO et al., 2008). Em geral, os solos

brasileiros são ácidos e apresentam carência de potássio, pois a forma solúvel do nutriente disponível para a planta é facilmente lixiviada no perfil do solo, levando-o para fora da zona de crescimento radicular (LIMA et al., 2017). Além disso, a baixa capacidade de troca de cátion (CTC) nesses solos implica na pequena capacidade de armazenamento de K. Em consequência dessas características, faz-se necessário o aumento da concentração desse nutriente nesses solos através da adubação mineral, para alcançar os valores desejados de produtividade agrícola (JÚLIO et al., 2016; BRACCINI et al., 2016).

Esse elemento é absorvido pelas plantas na solução do solo na forma iônica K^+ e no interior delas possui muitas funções; é responsável principalmente pela ativação das enzimas para a produção de proteínas e açúcares. Também está associado à regulação osmótica das células vegetais, absorção e perda de água, por abertura e fechamento dos estômatos; participa dos processos de fotossíntese e respiração, além de proporcionar maior resistência da planta à incidência de pragas e doenças, e ainda melhora a qualidade do produto colhido (NOVAIS et al., 2007; TAIZ et al., 2017; BORIN et al., 2017).

Estudos sobre aplicações e formas de fertilizantes na área agrônômica são frequentes, principalmente para reduzir perdas e aumentar a eficiência na agricultura (BOSSOLANI et al., 2018). A adubação potássica é fundamental, tanto para o incremento de produtividade, como para o manejo da sanidade em diversas culturas (GABRIEL et al., 2016).

Culturas com deficiência de potássio, além da redução do rendimento, produzem grãos pequenos, enrugados e deformados com baixo vigor e baixo potencial germinativo. A maturação da planta fica toda atrasada e pode causar a haste verde, aumento na retenção foliar e vagens chochas (SFREDO, 2008). A falta deste mineral ocasiona redução de assimilação de CO_2 e ocorre um funcionamento irregular das células estomáticas e redução da taxa fotossintética (CECÍLIO e GRANGEIRO, 2004).

A deficiência das plantas ocorre nas folhas mais velhas devido à grande mobilidade na planta (EPSTEIN e BLOOM, 2006). No estágio inicial da carência de potássio, aparecem manchas espalhadas irregularmente por toda a superfície foliar e nos espaços entre as nervuras, de cor amarela. Com a evolução dos sintomas, as manchas se unem e formam faixas nas margens das folhas, com posterior necrose dos tecidos (SFREDO, 2008). É comum os caules apresentarem aspectos delgados e fracos com entrenós curtos. Além disso, as folhas podem se enrolar e enrugar (TAIZ et al., 2017).

Plantas deficientes em potássio apresentam acúmulo de carboidratos solúveis, decréscimo do nível de amido e acúmulo de compostos nitrogenados solúveis, como os aminoácidos (TAIZ e ZEIGER, 2004). Também são menos capazes de absorver água e

estão mais sujeitas ao estresse quando o teor de água está abaixo do crítico para cultura (SERAFIM et al., 2012). Enquanto o excesso de potássio ocasiona redução de absorção de outros elementos, especialmente de cálcio e magnésio, devido ao efeito competitivo exercido pelo aumento de K disponível, uma vez que no processo de absorção esses nutrientes utilizam os mesmos sítios de absorção (SILVA et al., 2020). O inverso desta relação é mostrado por Medeiros et al., (2008), em que revelam que o aumento de Ca e Mg no solo implica diminuição de absorção do potássio.

Desta forma, para a obtenção de elevados índices produtivos, é necessário que o nível de nutrientes na solução do solo seja suficiente de modo a não limitar a taxa de absorção e o crescimento das plantas. Por outro lado, a elevada concentração de nutrientes pode induzir a redução no crescimento devido à toxidez ou interferência de certos elementos na absorção de outros pelas plantas e, desta forma, provocar deficiência (FONTES, 1987).

3.3.1 Potássio na cultura do milho

Dentre os nutrientes essenciais, o potássio, após o nitrogênio, é o elemento mais absorvido pelo milho, todavia, 20% são exportados nos grãos. Está associado principalmente com o controle osmótico e a translocação de açúcares, assim, proporciona maior qualidade, além de maior massa e resistência aos grãos (BARBOZA et al., 2011). A resposta do milho à adubação potássica varia quanto ao tipo de solo, saturação de Ca e Mg na solução e ao nível inicial destes no solo, à faixa de aplicação do adubo e ao material genético estudado (RAIJ et al., 2011). No milho, a deficiência de K provoca manchas marrons nos nódulos no interior do colmo. Além disso, a extremidade do milho não se desenvolve. As espigas apresentam sementes soltas e grãos dispostos não compactamente nos sabugos. Outro problema causado pela indisponibilidade de K no milho são os impactos da seca mais acentuada na planta. Isso acontece devido ao K estar envolvido na eficiência da utilização da água e, com a falta do nutriente no vegetal, os efeitos do estresse hídrico tornam-se mais evidentes (IPNI, 1993).

Estudos confirmam efeito positivo do K na cultura do milho, Schindwein et al., (2011) obtiveram resposta positiva à aplicação de K com aumento de 40,2 de grãos para cada kg de K_2O , adicionado ao solo para a cultura do milho. Rodrigues et al. (2014) constataram que a fertilização potássica na cultura do milho em níveis ideais para a área de cultivo foi capaz de influenciar positivamente a altura da planta, altura de inserção da espiga e quantidade de grãos por planta.

O trabalho de Petter et al. (2016) constatou a eficácia da fertilização potássica ao serem aplicados 48 kg de K_2O ha^{-1} na semeadura e 60 kg K_2O ha^{-1} por cobertura depois

de 30 dias da semeadura. Tal manejo proporciona melhor diâmetro do caule, altura de planta e produtividade de grãos. Ceretta et al. (2002) obtiveram respostas positivas ao uso de potássio na cultura de milho com ganho de 6% na produtividade com aplicação de 60 Kg ha⁻¹.

Rabêlo et al. (2013), em um experimento realizado em Alfenas, Minas Gerais, com o objetivo de investigar o uso de níveis diferentes e maneiras de utilização do potássio em caracteres agronômicos e bromatológicos de cultivo de milho para ensilagem. Os autores verificaram que houve maior produtividade quando o potássio foi utilizado no momento do plantio. Tais resultados são similares aos que foram alcançados por Medeiros (2016), que conduziu uma pesquisa em 2015 e obteve um nível mais eficiente na produtividade a partir da utilização dos níveis de 95 kg ha⁻¹ de nitrogênio e 76 kg ha⁻¹ de potássio, de forma respectiva.

David et al. (2019) analisaram o efeito de diferentes doses de potássio em adubação de base e cobertura na cultura do milho e assim verificaram que as melhores médias de altura da planta, altura de inserção da primeira espiga e diâmetro do caule foram influenciadas pela aplicação de potássio na base e na cobertura (V5). Já as variáveis grãos por planta e rendimento foram influenciadas pela maior dose de potássio em aplicação na base (65 kg de K₂O por ha⁻¹). Esses efeitos podem ser explicados devido ao K ser ativador de mais de 60 enzimas na planta, sendo importante na expansão do volume celular e transporte de íons até as células meristemáticas (PRADO, 2008).

Parente et al. (2016) estudaram a eficiência imediata do K no milho, segunda safra, e o possível efeito residual na cultura da soja cultivada em sucessão no sistema plantio direto. Assim, verificaram aumento na produtividade de milho até a dose de máxima eficiência técnica de 89 kg ha⁻¹ de K₂O e na soja até 80 kg ha⁻¹, além do aumento no número de vagens por planta e na massa de mil grãos. Os resultados confirmaram o efeito residual do K no cultivo da soja em sucessão.

Estudo semelhante foi realizado por Meneghette et al. (2019), que também verificaram os efeitos da adubação potássica e seu retorno potencial, realizada em gramíneas e a eficácia residual para a soja em sucessão em sistema de plantio direto. Os autores constataram que o milho inserido no sistema demonstrou elevada produção de matéria seca em ambos os anos na aplicação de 70 kg ha⁻¹ de KCl. Para acúmulo de K, tanto na palhada como em folhas de soja em sucessão, o milho destacou-se, em ambos os anos, ao se utilizar a dose de 35 kg ha⁻¹ de KCl. A sucessão sorgo-soja propiciou maior produtividade de grãos quando submetida a doses de 70 kg ha⁻¹.

Já no estudo de Silva et al. (2020) sobre o acúmulo de macronutrientes na palhada de milho fertirrigado com doses e fontes de potássio, os autores verificaram a

influência das fontes de potássio no acúmulo de palhada, apenas para o enxofre. Os autores ressaltam que a não influência das doses e as fontes de potássio na quantidade de macronutrientes acumulados na palhada podem estar relacionados ao acúmulo do nutriente nos grãos. Assim, a reciclagem de nutrientes através da palhada do cultivo anterior é um dos benefícios do sistema de plantio direto, e o manejo da fertilização pode influenciar neste retorno. Dessa forma, é importante o manejo adequado da adubação potássica para reduzir as perdas e evitar o esgotamento de potássio do solo. Pauletti e Motta (2017) recomendam, para o estado do Paraná, valores de acordo com a disponibilidade do nutriente no solo e com a produtividade esperada, descrita na Tabela (4).

Tabela 4 Adubação potássica para cultivo de milho no estado do Paraná

| K no solo | Produtividade de grãos esperada (t ha ⁻¹) | | | |
|-------------------|---|----------|----------|----------|
| | <8 | 8-12 | 13-16 | >16 |
| | K ₂ O (Kg ha ⁻¹) | | | |
| Muito baixo | 100-130 | Inviável | Inviável | Inviável |
| Baixo | 70-100 | 101-130 | 131-160 | 161-190 |
| Médio | 40-70 | 71-100 | 101-130 | 131-160 |
| Alto | 20-40 | 41-70 | 71-100 | 101-130 |
| Muito alto | 20 | 20-41 | 41-70 | 71-100 |
| Condição a evitar | 0 | 0 | 0 | 0 |

Fonte: Pauletti e Motta (2017).

3.3.2 Potássio na cultura da soja

O Potássio é o segundo nutriente mais absorvido pela soja, e fica atrás somente do nitrogênio, tanto que em cada 1.000 kg de sementes produzidas são extraídos 20 kg de K₂O (MASCARENHAS et al., 2004). Tanaka, Mascarenhas e Borkert (1993) também obtiveram dados semelhantes em uma produção média de 18.000 kg, e os autores verificaram que a cultura extraiu 343 Kg de potássio.

Em condições de baixo teor de potássio no solo, a soja pode apresentar sintomas de deficiência desse elemento nas folhas, com haste verde, retenção foliar e formação de frutos partenocárpios na soja. Plantas sem vagens no terço superior, vagens vazias e retorcidas, chochamento e mau pegamento de vagens nos racemos superiores, alto índice de acamamento de plantas, redução da qualidade de sementes e redução na produtividade, menor desenvolvimento radicular e ataque severo de *Phomopsis* nas hastes e vagens em maturação, também são sintomas de deficiência de potássio na soja (MASCARENHAS et al., 2004).

A deficiência desse elemento pode prejudicar severamente a síntese proteica e resulta em acúmulo de concentração de aminoácidos livres no tecido da planta de soja. Afeta o crescimento da planta, o rendimento e o aumento da susceptibilidade a doenças e pragas. Para Domingos et al. (2015), os principais sintomas de deficiência de potássio

na soja são a clorose internervural, seguida de necrose no ápice e nas bordas das folhas mais velhas, além de causar a redução na fotossíntese e diminuir a qualidade das sementes. Já o fornecimento adequado desse nutriente na cultura promove ganhos de rendimentos significativos como no número de vagens por planta, porcentagem de vagens com grãos e aumento da nodulação. Bem como maior qualidade na semente há aumento na concentração de óleo, diminuição da incidência de doenças sobre a cultura e promove a tolerância aos fatores abióticos (TRIGOLO et al., 2015; MANTOVANI et al., 2017).

Antigo et al. (2020) verificaram que a adubação potássica promoveu aumento das variáveis altura e massa seca aérea. A adubação também proporcionou aumento de 31% da produtividade da cultura. Resultados obtidos por Balardin et al. (2006) evidenciam a influência do potássio na cultura da soja sobre a redução da severidade e a taxa de progresso da ferrugem asiática, causada pelo fungo *Phakopsora pachyrhizi*.

Sediyama (2016) ressalta que uma das principais maneiras utilizadas para ocasionar o incremento produtivo é através da adubação mineral, bem como a adubação potássica se destaca na cultura da soja. Foloni e Rosolem (2008) constataram que a produtividade da soja aumentou para solos com teores médios de K e doses de 90 kg ha⁻¹ em solos de teores médios. Para Mantovani et al. (2017), o potássio está diretamente relacionado às altas produtividades da soja, e atua nas atividades celulares, promove tanto a abertura como o fechamento estomático e controle osmótico dos tecidos, além de atuar nas atividades enzimáticas. Lima et al. (2017) afirmam que o potássio além de afetar o rendimento, tem efeito direto no teor de proteínas e óleo nos grãos.

As respostas produtivas são facilmente notadas, pois a cultura é altamente responsiva em absorção e translocação de nutrientes, principalmente ao nitrogênio, fósforo e potássio, que são exportados em maior quantidade (GABRIEL et al., 2016). Guesser et al. (2021) avaliaram a adubação organomineral e mineral à resposta da soja em terras baixas e assim verificaram que a cultura da soja respondeu positivamente às doses de adubação com a fonte organomineral, com aumento da altura de plantas, altura de inserção da primeira vagem, número de vagens por planta e produtividade. Os fertilizantes organomineral e mineral foram equivalentes na nutrição da cultura da soja.

Zambiazzi et al. (2017) avaliaram o efeito da adubação potássica sobre caracteres agronômicos, teor de óleo e qualidade sanitária de sementes de soja e assim observaram que o aumento nas doses de potássio alterou a composição química das sementes e incrementou significativamente o teor de óleo. No entanto, não houve efeito para os caracteres agronômicos e o rendimento de grãos. Os níveis de patógenos nas sementes aumentaram à medida que se diminuiu o fornecimento de potássio para as plantas. Outro benefício da realização desta adubação está relacionado à umidade do solo. Serafim et

al. (2012) estudaram diferentes doses de potássio em solos tropicais e verificaram efeito compensatório do K e da umidade do solo entre si, onde um fator tende a reduzir o efeito da deficiência do outro fator com repercussão no rendimento de grãos.

Muitos são os benefícios da adubação potássica na cultura da soja. Para uma adubação adequada, Pauletti e Motta (2017) recomendam valores de acordo com a disponibilidade do nutriente no solo e com a produtividade esperada para o estado do Paraná, conforme a Tabela (5).

Tabela 5 Adubação potássica para cultivo de soja no estado do Paraná

| K no solo | Produtividade de grãos esperada (t ha ⁻¹) | | | |
|-------------------|---|---------|----------|----------|
| | <3 | 3-4 | 4,1-5 | >5 |
| | K ₂ O (Kg ha ⁻¹) | | | |
| Muito baixo | 81-100 | 101-120 | Inviável | Inviável |
| Baixo | 61-80 | 81-100 | 101-120 | Inviável |
| Médio | 41-60 | 61-80 | 81-100 | 101-120 |
| Alto | 20-40 | 41-60 | 61-80 | 81-100 |
| Muito alto | 20 | 20-40 | 41-60 | 61-80 |
| Condição a evitar | 0 | 0 | 0 | 0 |

Fonte: Pauletti e Motta (2017).

3.4 Agricultura de precisão e agricultura digital

Na literatura, existem diversas definições para agricultura de precisão, o Grupo de Pesquisa da Universidade de Lleida em AgroTIC e Agricultura de Precisão lista 27 definições da literatura científica e da internet (LLEIDA, 2018). A primeira da lista a define como uma prática agrícola, cujo objetivo é aplicar insumos no local correto, no momento adequado e de maneira adequada (PIERCE et al., 1994). Já a última tem a agricultura como o gerenciamento das variabilidades espacial e temporal nos campos e utiliza as tecnologias da informação e comunicação (FOUNTAS et al., 2016).

A Sociedade Internacional para Agricultura de Precisão (ISPA), após uma conferência entre seus membros, a definiu como uma estratégia de gestão que reúne processamento e análise de dados temporais, espaciais e individuais e os combina com outras informações para apoiar as decisões de gerenciamento de acordo com a variabilidade estimada para melhorar a eficiência no uso de recursos, produtividade, qualidade, rentabilidade e sustentabilidade da produção agrícola (ISPA, 2019). A Comissão Brasileira de Agricultura de Precisão (CBAP) a considera como um conjunto de ferramentas e tecnologias aplicadas que permite um sistema de gerenciamento agrícola baseado na variabilidade espacial e temporal da unidade produtiva que visa ao aumento de retorno econômico, à sustentabilidade e à minimização do efeito ao ambiente (LANDGRAF, 2015).

Com os avanços tecnológicos, a agricultura de precisão passou a contar com a Agricultura Digital também chamada de Agricultura 4.0, termo inspirado na Indústria 4.0 proposto pelo governo alemão, que se refere à revolução industrial (ZHAI et al., 2020). Essa parceria permite a agricultura de precisão automatizar todos os processos e otimizar a produção (PIVOTO et al., 2018; ZAMBON et al., 2019; BASSOI et al., 2019; ZAMBON et al., 2019).

Por serem utilizadas em conjunto, produtores as confundem ao considerá-las a mesma coisa, mas existe diferença entre elas, uma vez que agricultura de precisão tem o conceito de aplicar os insumos no local correto, no momento adequado e de maneira adequada, com base na variabilidade espacial e temporal dos atributos do solo e das culturas, associado ao conhecimento agrônomo e ao histórico da área (BALASTREIRE, 1994, 1998). Já a agricultura digital se refere à incorporação do conjunto de tecnologias de informação e comunicação em máquinas, equipamentos modernos e sensores em sistemas de produção agrícola, responsáveis pela coleta e o processamento de dados sobre a área, (PIVOTO et al., 2018; GUILHERME BUCK, 2020; MENDES et al., 2020; BASSOI et al., 2019).

Portanto, técnicas de precisão que otimizam recursos e proporcionam maior produtividade e sustentabilidade com uso da tecnologia são consideradas como agricultura de precisão. Já as ferramentas digitais que permitem gerar grande volume de dados e informações com evolução da automação dos processos e que auxiliam o produtor a acompanhar mais de perto a lavoura e na tomada de decisão referem-se à agricultura digital (GUILHERME BUCK, 2020).

A aquisição de todos esses recursos requer investimento de alto custo, portanto, esta técnica torna-se menos acessível aos pequenos e médios produtores. Contudo, a agricultura de precisão não envolve apenas custos e receitas, pois todas essas ferramentas tratam, especificamente, cada ponto da propriedade agrícola. Verificam-se particularidades no solo, as ferramentas dão suporte para determinadas tomadas de decisão do agricultor quanto ao manejo mais apropriado e eficaz para os recursos na lavoura, como os fertilizantes, de modo que os custos com insumos podem ser reduzidos, assim como o impacto ambiental, aliados ao incremento da produção (LOWENBERG-DEBOER e ERICKSON, 2019).

A aplicação em zonas de manejo representa uma alternativa mais econômica que pode viabilizar a adoção da agricultura de precisão, já que tal metodologia permite utilizar os mesmos sistemas utilizados na agricultura convencional. Há alteração apenas nas dosagens dos insumos na transição de uma zona para a outra, e ainda é possível a retirada de uma única amostra composta de solo por zona, conseqüentemente há a redução dos custos com as análises laboratoriais. O principal motivo para a adoção das

técnicas de agricultura de precisão está no incremento da produção em quantidade e qualidade das culturas, que reflete diretamente em lucro para o produtor. A expectativa de redução de custos está relacionada principalmente ao fato de que os insumos agrícolas serão aplicados somente onde de fato se faz necessário e não em toda a extensão da área cultivada (BERNARDI et. al., 2017).

Dessa forma, a agricultura de precisão é apontada como uma alternativa capaz de aumentar o potencial de produção das culturas, redução de custos, bem como os impactos ambientais. Parte-se da premissa de que os recursos naturais são finitos, muitos dos quais não são renováveis, e que estes devem ser explorados de forma cada vez mais eficiente, em termos de uso de insumos, de melhoria da qualidade de vida e de conservação ambiental (ARTUZO, SOARES e WEISS, 2017).

3.5 Aplicação de fertilizantes em taxa variável

O fundamento base da agricultura de precisão é a existência de variabilidade espacial dentro de um campo de produção. A variação espacial dos atributos do solo têm como causa diversos fatores, como os processos de sua formação, assim como o tipo de manejo deste solo e das práticas agrícolas realizadas, seja no preparo do solo, sistemas de plantio, adubação, entre outras (CARVALHO; SILVEIRA e VIEIRA, 2002; RESENDE et al., 2006). A variabilidade dos atributos químicos do solo como, matéria orgânica, fósforo e potássio pode ser corrigida com a técnica de aplicação de fertilizantes em taxa variável. Este processo pode ser resumido em quatro grandes etapas (SARAIVA, 2000) (Figura 1).

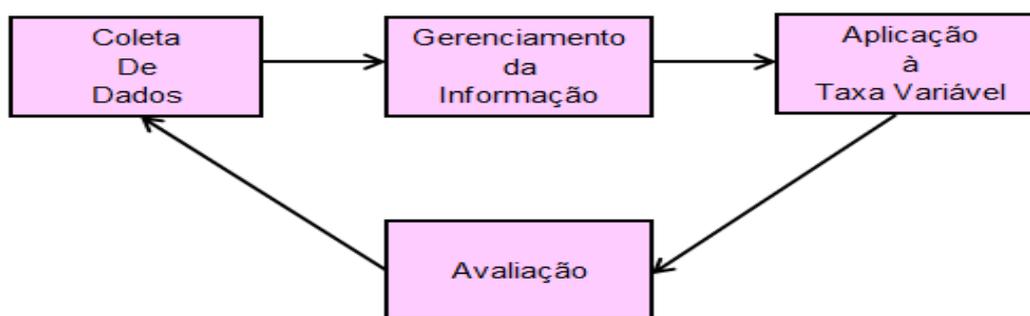


Figura 1 Etapas básicas da agricultura de precisão
Fonte: Adaptado de SARAIVA (2000)

Na primeira etapa, é realizada a coleta de dados que visa identificar a variabilidade existente na área produtiva, como produtividade, solo, pragas, ervas daninhas, dentre outras. Nesta coleta, diversos equipamentos e técnicas podem ser utilizados, como monitores de colheita ou mesmo manual, amostragem de solo, sensoriamento remoto, associados a sua posição no campo, fornecida por um receptor Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS). Posteriormente as amostras são enviadas a análises laboratoriais.

A segunda etapa refere-se ao processamento dos dados que necessita de um Sistema de Informação Geográfica (SIG), capaz de capturar os resultados das análises, armazenar, consultar, manipular, analisar, e fornecer informações relevantes acerca dos fatores que causam a variabilidade do solo e das culturas. Nesta etapa, são gerados os mapas temáticos referentes aos diversos dados, produtividade características físicas e químicas do solo, dentre outras. Por fim, são gerados os mapas de recomendação ou aplicação dos insumos com as doses adequadas a serem aplicadas em cada ponto da área amostrada.

Na terceira etapa, é realizada a aplicação dos insumos à taxa variável. Os mapas de recomendação de nutrientes, os quais fornecem as doses adequadas dos fertilizantes, que devem ser aplicadas em cada ponto do talhão. Os mapas de recomendação de nutrientes devem inseridos em softwares dos computadores embarcados nas máquinas agrícolas, equipadas com dispositivos responsáveis pela variação da dose recomendada, como sensores, controladores, atuadores. Eles são controlados por um receptor global de navegação por satélite (GNSS) de alta precisão, para aplicar o fertilizante ao longo do talhão. No caso da aplicação à taxa variável em zonas de manejo, a distribuição dos fertilizantes pode ser realizada com equipamento convencional e alterar as vazões apenas na mudança de unidades de zonas (BAZZI et al., 2013; MOLIN, 2017).

A quarta etapa, refere-se à avaliação dos resultados, que dever ser realizada em todos os processos, para que as informações resultantes sejam confiáveis, e que sirvam de apoio aos produtores nas tomadas de decisões do melhor manejo da produção (MOLIN, 2017). Todas essas etapas fazem parte de um ciclo constante, que é realimentado a cada safra com novos dados para ser analisados em novos cenários. A realimentação permite analisar a variabilidade temporal e adequar às práticas agrícolas e aprimorar todo processo de produção (SARAIVA, 2000). Assim, as aplicações de fertilizantes à taxa variável contribuem não somente com aumento da produtividade e com o rendimento económico das culturas, como também ajudam a reduzir os impactos ambientais, pois a aplicação excessiva de fertilizantes pode resultar em contaminação das águas subterrâneas (COELHO et al., 2009; BAZZI, 2015; SOUZA et al., 2018).

Cherubin et al. (2011), em pesquisa sobre a viabilidade técnica e econômica da utilização de taxa variável em área manejada com agricultura de precisão, verificaram redução no custo da aplicação de calcário em R\$ 1.970,50 em relação à aplicação convencional. No caso da adubação fosfatada, a diferença entre taxa variável e taxa fixa pela média foi de R\$ 5.301,50. A adubação potássica resultou em maior investimento na taxa variável, R\$ 1.416,00 a mais do que na aplicação convencional. Contudo, as aplicações desses três insumos à taxa variável somarão R\$ 74.606,02 e no método tradicional R\$ 89.462,20, economia de R\$ 5.856,00 na área total. Os resultados desses autores corroboram com vários outros, os quais também verificaram que a aplicação em taxa variável possibilitou a racionalização de fertilizantes e corretivos (AMADO et al., 2006; DURIGON, 2007; WERNER, 2007; BELLÉ, 2009).

Bernardi et al. (2018), além de observarem redução no custo da produção de pastagem de Capim Tanzânia com a tecnologia de aplicação em taxa variável de calcário e superfosfato simples, também observaram aumentos dos valores do pH, P, Ca, Mg e a V%. Os autores concluíram que a tecnologia da aplicação de insumos à taxa variável pode ser utilizada como ferramenta de correção e adubação do solo levando à maior homogeneidade dos atributos químicos do solo e redução do custo de produção. Delgado et al. (2015) verificaram que o uso de zonas de manejo para aplicação à taxa variável aumentou a produtividade, diminuiu custos e impactos ambientais das práticas agronômicas.

Molin (2017), com dados de pesquisa sobre a adoção da agricultura de precisão no Brasil, relata que a técnica mais utilizada pelos produtores é o mapeamento da fertilidade do solo. O objetivo é a geração de mapas da variabilidade de nutrientes a partir da sua amostragem georreferenciado do solo. Consequentemente, para corrigir a variabilidade de nutrientes, é necessária a utilização de técnicas de aplicação de fertilizantes em taxa variável, sendo essa considerada a segunda técnica mais adotada (58%).

3.6 Mapas temáticos

Mapas são veículos de transmissão de conhecimento que apresentam características específicas de determinado espaço geográfico (LOCH, 2006). Logo, quando há um tema associado ao mapa, além da representação do terreno, são definidos como um mapa temático, cuja função é fornecer a visualização de dados espaciais, por meio de símbolos gráficos, a ocorrência de um fenômeno, de acordo com seu propósito de elaboração (JOLY, 2005, RECH; OLIVEIRA e LOCH, 2015).

Um tipo de mapa temático de extrema importância utilizado na AP é o mapa de

produtividade, o qual é obtido por monitores de colheita, acoplados nas máquinas colhedoras, ou de forma manual e registra a quantidade de grãos colhidos em cada parte do talhão. Mapas de colheita são considerados o ponto de partida para o gerenciamento da variabilidade espacial da produtividade das lavouras, por materializar a resposta da cultura e evidenciar as regiões com alta e baixa produtividade (MOLIN, 2002; MALDANER, CHAN e MOLIN, 2019).

Pelo mapeamento da produtividade, é possível identificar e quantificar a variabilidade espacial da produtividade das culturas e assim obter subsídios para a tomada de decisões nos processos de gerenciamento localizado, acerca dos diversos fatores que afetam o rendimento das culturas (BAZZI, 2015; EITELWEIN, et al., 2016).

Mapas de produtividade também podem ser utilizados para mapear custos de produção. Pelos dados de receita juntamente com os custos de produção, podem-se gerar mapas de lucratividade que fornecem informações importantes para auxiliar o gerenciamento localizado da lavoura, custos aceitáveis e futuros investimentos na área (RUSSINI, CHERUBIN e BERAS, 2016; BAZZI et al., 2015; MALDANER, CHAN e MOLIN, 2019). Outra função dos mapas de produtividade é ser fonte de informação para a definição e consolidação de zonas de manejo (MOLIN, 2002). Se a produtividade se expressa de maneira similar ao longo dos anos, é possível realizar uma análise de sequência temporal e gerar mapas de estabilidade produtiva, os quais evidenciam zonas com baixa, média e alta produtividade, que servem de base para intervenções localizadas, ou seja, em zonas de manejo (SANTI, 2013).

Outro tipo de mapa temático muito utilizado em AP são os mapas de disponibilidade de nutrientes ou mapas de fertilidade. Tais mapas são comumente obtidos a partir da análise de amostras de solo georreferenciadas coletadas em campo. Por esses mapas é possível identificar a fertilidade do solo disponível para a planta, pois apresentam os locais onde existe deficiência ou excesso de um nutriente, para que seja realizada a adição de fertilizantes em taxa variável. Assim, evita-se que seja aplicado fertilizante em excesso em pontos saturados ou pouco fertilizante em áreas com escassez (BAZZI, 2015; SOUZA et al., 2018). A análise química do solo determina propriedades de elementos essenciais para o crescimento das plantas, como os micros e macronutrientes, teor da matéria orgânica, pH, etc. Araújo (2020) gerou mapas de fertilidade a partir do resultado desta técnica.

Já a análise física do solo determina propriedades como textura (teores de argila, areia e silte), densidade de solo, porosidade total, macro e microporosidade, resistência do solo a penetração, dentre outros. Um exemplo de mapas de textura pode ser visto no trabalho de Sobjak (2021). Este autor analisou o desempenho de um método que seleciona automaticamente o melhor interpolador para um conjunto de dados e assim

gerou mapas com maior precisão.

Mapas de fertilidade podem ser utilizados para confecção dos mapas de recomendação de corretivos e adubação. A correção da acidez no solo é um importante método para aumentar a capacidade de troca catiônica (CTC), a mineralização da matéria orgânica, melhorar o aproveitamento de nutrientes pelas plantas e principalmente reduzir o teor de alumínio tóxico no solo. Quando o alumínio está em níveis elevados, ele interfere na movimentação do fósforo, cálcio, magnésio e molibdênio e causa impactos negativos nos solos sobre e no desenvolvimento das plantas (MORTON, 2018). Moreira (2019) analisou três métodos de cálculo de necessidade de calcário. O autor gerou mapas de recomendação com duas, três, quatro e cinco classes e concluiu que o método SB apresentou os melhores resultados, além de apresentar melhor a distribuição dos dados.

Os mapas de recomendação de adubação, derivados dos mapas de fertilidade, contêm informações sobre a quantidade necessária de um nutriente, demandada por cada pixel, ou seja, os mapas de recomendação de adubação indicam as quantidades necessárias dos insumos que devem ser aplicadas em cada ponto do talhão, bem como o melhor produto a ser utilizado para determinado cultivo, com o objetivo de aumentar a produtividade aliada à rentabilidade, na busca pela máxima eficiência técnica e econômica (MOLIN, 2006; RESENDE et al., 2014; MOLIN, 2017). Mapas de recomendação de nutrientes também podem ser gerados baseados na exportação dos nutrientes evidenciada no mapa de produtividade, ou seja, onde a produtividade foi maior. Houve mais extração de nutrientes do solo, portanto, esses locais necessitam de maior reposição por adubação, o que torna a aplicação dos insumos mais inteligente e precisa (MALDANER, CHAN e MOLIN, 2019).

O produtor que faz adubação sem recomendação adequada desperdiça insumos, pois pode superestimar ou subestimar a real necessidade da dosagem de aplicação, resultando em prejuízo, além de prejudicar o meio ambiente. O uso racional de adubos e corretivos na agricultura contribui para a otimização da renda líquida dos produtores rurais, além de minimizar os impactos sobre o meio ambiente, pois aplicação excessiva de fertilizantes pode resultar em contaminação das águas subterrâneas (HOLLAND e SCHEPERS, 2010).

3.6.1 Criação de mapas temáticos

Um mapa temático pode ser gerado por diversas maneiras. No entanto, estudos em AP vêm sendo realizados com o objetivo de encontrar métodos mais adequados para a criação de mapas com maior precisão. Souza et al. (2018) propuseram um protocolo de

criação e todo processo se resume em três etapas (Figura 2).

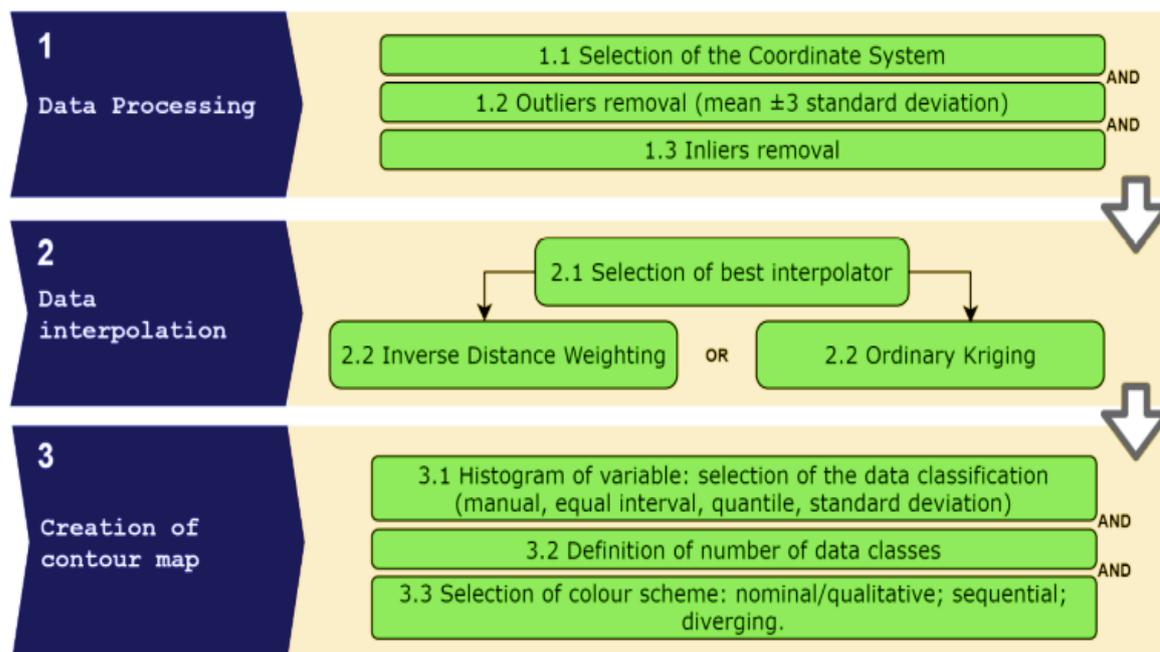


Figura 2 Fluxograma do protocolo típico para criar um mapa temático

Fonte: Souza et al. (2018)

3.6.1.1 Processamento dos dados

A criação de um mapa temático inicia-se ainda na coleta de dados. A aquisição dos dados pode ser realizada com o auxílio de GNSS que localiza os pontos amostrais georreferenciados de uma área em estudo, para posteriormente coletar amostras de interesse como atributos do solo, planta e produtividade. Após as análises laboratoriais, os dados devem ser inseridos em um arquivo com suas respectivas coordenadas de longitude, latitude e o valor do atributo medido de cada ponto amostrado. Esse arquivo deve ser importado em um SIG, o qual possui capacidade de capturar, armazenar, consultar, manipular, analisar, exibir e imprimir informações referenciadas geograficamente, dispostas em camadas ou planos de informação, também conhecidas como *layers*, pela integração de *softwares*, *hardwares* e recursos humanos.

Qualquer SIG requer um sistema de projeção de coordenadas para definir as posições dos pontos em determinado espaço, que pode ser em duas ou três dimensões. Os sistemas de Coordenadas Cartesianas como Universal Transversal de Mercator (UTM) são utilizados para representar a superfície da Terra sobre um plano. Esse sistema é baseado no plano cartesiano (eixo x, y) e usa o metro (m) como unidade para medir distâncias e determinar a posição de um objeto. Após selecionar o sistema de coordenadas, é preciso selecionar o sistema geodésico de referência ou *datum*, o qual permite descrever as posições dos pontos no mapa pela latitude e longitude e que está

diretamente relacionado ao UTM.

O *Datum* de referência mais utilizado é o *World Geodetic System 1984* (WGS84), o mesmo sistema de referência empregado pelo sistema GPS. Esses dois sistemas de coordenadas permitem identificar a posição de determinado ponto na superfície da Terra e suas correspondências no plano de projeção do mapa. Ao elaborar um mapa, é preciso se certificar de que todos os dados espaciais possuem o mesmo *Datum*, do contrário as camadas poderão ficar distorcidas (CRUZ, 2020). Ainda, durante a coleta dos dados, podem ocorrer alguns erros como coletas indevidas, erros de medição por parte dos sensores entre outros, que podem ser refletidos nos mapas temáticos. Neste contexto, alguns estudos foram realizados a fim de identificar, corrigir ou remover erros encontrados nos arquivos de dados com o objetivo de melhorar a qualidade da informação (MENEGATTI e MOLIN, 2003 e 2004, MALDANER et al., 2015).

A filtragem dos dados é uma prática adotada para eliminar esses tipos de erros, pela sua segurança e praticidade (MICHELAN, SOUZA e URIBE-OPAZO, 2007). Córdoba et al. (2016) sugerem remover pontos fora da média \pm três desvios padrões, considerados discrepantes e pontos *inliers* que diferem significativamente de seus vizinhos. Desta forma, recomenda-se realizar uma análise exploratória nos dados brutos e por meio de algoritmos de filtragem para fazer a remoção dos pontos nulos, duplicados, *outliers* e *inliers* dentro de um conjunto de dados. Visto que esses tipos de dados prejudicam a qualidade das informações e podem levar a interpretações errôneas. Neste sentido, é de extrema importância que esses erros sejam removidos antes de qualquer análise dos mapas (GIMENEZ e MOLIN, 2004).

3.6.1.2 Interpolação espacial de dados

A interpolação é a arte de ler entre valores de uma tabela (SADOSKY, 1980). Em termos matemáticos, é o processo de encontrar valores intermediários entre os valores discretos de uma função (STARK, 1979). Possui um método que converte os dados de observações pontuais em campos contínuos, de forma que padrões espaciais sejam formados e os compare com outros padrões de entidades espaciais contínuas. Isso permite visualizar o comportamento da variável na região amostrada pontualmente, por meio de um mapa de superfície (BAZZI, 2015). Trata-se de uma técnica matemática, que busca estimativas precisas de valores de um atributo em uma região em locais não amostrados, com base em valores de dados observados em locais conhecidos (COELHO, 2006; BAZZI, 2015). Essa técnica pressupõe que os pontos amostrais vizinhos possuem valores com maior similaridade entre si, em relação aos pontos amostrais mais distantes (YAMAMOTO e LANDIM, 2013; LONGLEY et al., 2013). Esse

conceito fundamenta a base das relações espaciais entre fenômenos geográficos, que utiliza a correlação espacial como meio de diferença dos atributos estimados (JAKOB e YOUNG, 2016; LAMPARELLI, 2006).

Na criação de mapas temáticos em AP, os interpoladores mais utilizados são Krigagem Ordinária (KO), inverso da distância elevado a uma potência (IDP), inverso da distância ao quadrado (IDQ) (MAZZINI e SCHETTINI, 2009; PARK e JANG, 2014). A KO é um método geoestatístico estimador que tem como objetivo encontrar o melhor conjunto de ponderadores, de tal forma que a variância do erro de estimativa seja a mínima possível (LANDIM, 2003). Assim, ela é definida como o melhor estimador linear não tendencioso, sem viés e com mínima variância (ISAAKS e SRIVASTAVA, 1989). É considerada a melhor em comparação com outros interpoladores, por minimizar a variância dos erros estimados, e linear. Suas estimativas são combinações lineares ponderadas das medidas, não tendenciosas porque, em média, a diferença entre os valores estimados e observados é nula, e não enviesada, pois procura que a média dos erros de estimação seja igual à zero (ISAAKS e SRIVASTAVA, 1989; GREGO et al., 2014).

Assim, a Krigagem estima os valores em qualquer posição dentro da região a ser interpolada, utilizando distâncias ponderadas e estimativas por médias móveis. E leva em consideração a correlação espacial entre as observações vizinhas, com base na teoria das variáveis regionalizadas (VIEIRA, 2000; MATHERON, 1971). Ela também utiliza a semivariância como medida básica para determinar o grau de dependência entre as amostras. Assim, é permitido apresentar a variação espacial em um gráfico de dispersão conhecido como semivariograma, no qual é possível analisar a dependência espacial entre as amostras (HUIJBREGTS, 1975). Cambardella et al. (1994) classificam a dependência espacial com forte se ($IDE < 25\%$), moderada ($25\% < IDE < 75\%$) e fraca ($IDE > 75\%$). Como produto final, a KO fornece um mapa temático de superfície que possibilita examinar a variabilidade espacial da variável estudada.

Estudos têm sido realizados para saber qual é o interpolador mais adequado para a construção dos mapas temáticos. A KO tem sido considerada o melhor método de interpolação quando os dados possuem dependência espacial e quando não existe dependência espacial, tem sido recomendado o uso do inverso da IDP (BIER e SOUZA, 2017; SOUZA et al., 2018).

O IDP assume a suposição de que cada amostra de ponto tem influência local, que diminui conforme a distância entre eles aumenta. Assim, o IDP estima a variável de interesse e atribui maior peso aos pontos mais próximos e menor peso aos mais distantes (MENDEZ et al., 2019). Em relação ao peso, este é pré-estabelecido de acordo com a potência escolhida e quanto maior for o valor, menores serão a influência e a

contribuição dos pontos mais distantes. A potência mais utilizada neste interpolador é a de 2ª ordem e, por esse motivo, é também conhecido como o inverso da distância ao quadrado (IDQ) (MAZZINI e SCHETTINI, 2009). Tanto o IDP como o IDQ são interpoladores considerados simples e de fácil aplicação. No entanto, esses métodos são menos acurados que a krigagem, por não considerarem a estrutura da dependência espacial para estimar valores para locais não amostrados. Entretanto, esses interpoladores são amplamente utilizados, em que o melhor depende principalmente do atributo a ser estimado (MAZZINI e SCHETTINI, 2009).

Neste contexto, para facilitar a escolha de interpoladores na criação de mapas temáticos em AP, Bier e Souza (2017) propuseram o índice de seleção de interpolação (ISI) que identifica o melhor interpolador entre KO e IDP para um conjunto específico de dados. O ISI é determinado pela validação cruzada de Isaaks e Srivastava (1989) que calcula o erro médio (EM) e o desvio padrão do erro médio (DPEM). Os valores calculados de EM e DPEM para cada conjunto de parâmetros são armazenados e utilizados para determinar o ISI, que compara os métodos de interpolação e identifica os melhores parâmetros para KO, bem como o melhor expoente a ser utilizado no método IDP, para cada um dos modelos analisados. Por fim, o melhor interpolador a se utilizar é aquele que apresenta o menor valor para ISI.

3.6.1.3 Criação do mapa de contorno

A criação de mapas temáticos envolve um processo de classificação dos dados, que corresponde em conhecer a distribuição das variáveis, definir o número de classes que deve ser representado e definir o método de classificação que irá estabelecer os intervalos das classes (AIKES et al., 2021). O objetivo é representar graficamente as diferenças entre os subconjuntos de dados e revelar padrões difíceis de serem percebidos quando os dados não são agrupados (KRYGIER e WOOD, 2005).

Desta forma, o primeiro passo no agrupamento dos dados é realizar uma análise de estatística descritiva, pela qual é possível a obtenção de informações do conjunto amostral, e a distribuição de frequência que pode ser visualizada em um histograma (SIEGEL e JUNIOR, 2006). Alguns métodos de classificação se baseiam na distribuição das variáveis para definir as quebras dos intervalos. Portanto, realizar a classificação de um conjunto amostral, sem antes analisar os dados que o constitui o torna um procedimento inapropriado (MORETTIN, 2005).

O segundo passo é definir o número de classes, um fator essencial a ser levado em consideração. Quanto maior o número de classes, mais complexa será a leitura do mapa, por outro lado quanto menor for número de classes, maior será a generalização do

fenômeno e, portanto, maior a omissão dos detalhes do conjunto de dados (DENT et al., 2009). Ainda não existe critério estatístico que determina o número exato de classes para mapas de dados quantitativos (SLOCUM, et al., 2009). Porém, alguns estudos recomendam o uso de no máximo cinco classes (DENT et al., 2009; CROMLEY e YE, 2006), enquanto outros aconselham não exceder o número de sete classes (SOUZA et al., 2018; AIKES et al., 2021).

Definido o número de classes, o último passo do processo é definir o método que realizará a tarefa de classificação. De acordo com Souza et al. (2018), os métodos mais utilizados são: intervalo igual, quartil, desvio padrão e intervalo manual.

O método de intervalo igual realiza a divisão dos dados em classes definidas com amplitude constante, ou seja, do mesmo tamanho. Destaca-se por sua simplicidade de cálculo, facilidade de interpretação dos resultados e legenda de fácil compreensão por apresentar valores ordenados e contínuos (SLOCUM et al., 2009). Este método não se baseia na distribuição dos dados, logo, é apropriado para dados que estão distribuídos de forma semelhante por toda a amplitude do conjunto de dados e deve ser evitado para agrupar dados com distribuição assimétrica, em que as observações são concentradas em uma ou duas classes apenas (SLOCUM et al., 2009).

Pelo método quartil, as classes são divididas com o mesmo número de elementos, no entanto, a amplitude pode variar de uma classe para a outra. Este método enfatiza diferenças no meio da faixa de valores e também não gerar classes vazias. Porém, o método quartil pode colocar valores similares em classes diferentes, bem como valores dissimilares colocados em uma mesma classe, cujo resultado é um mapa enganoso (CARVALHO, 2005). Já o desvio padrão calcula o valor médio e o desvio padrão dos dados. Desta forma, a distribuição dos dados é apresentada acima e abaixo da média amostral, ou seja, é possível saber o quão diferente é cada valor em relação à tendência central de toda a distribuição (FERREIRA, 2014). As vantagens deste método é que ele não produz *gaps* na legenda e não requer mais de seis classes para representar todo o conjunto de dados. No entanto, ele exige distribuição normal (DENT, et al., 2009).

Como o próprio nome sugere, o método intervalo manual permite que o pesquisador defina manualmente os intervalos das classes, de acordo com suas necessidades, ajustes dos dados e produza um mapa preciso. Esse método pode ser uma alternativa quando os outros métodos não apresentam bons resultados (SOUZA et al., 2018; AIKES et al., 2021).

Outro fator importante na criação de mapas temáticos é a escolha do esquema de cores. As cores devem ser escolhidas com cuidado, em composições harmoniosas, de tal forma que a mensagem do mapa fique clara e que seja entendida com facilidade. A variável 'cor' indica o comportamento dos dados, conforme a reflexão da luz visível, ou

seja, o comprimento de onda da radiação, e pode ser expressa por matiz, saturação e luminosidade (OLIVEIRA e ROMÃO, 2021). O matiz corresponde ao nome real da cor, ou seja, a cor pura, àquela a que não se adicionou preto ou branco, ou ainda é a variação cromática na sequência espectral, definida pelo intervalo dominante de comprimentos de onda na faixa visível que produz a cor percebida (OIVEIRA, 2005).

A saturação é a variação do matiz, isto é, a intensidade da cor, o quanto a cor se afasta ou se aproxima da cor neutra (cinza). Quanto mais afastada do cinza mais vibrante a cor será, e quando diminui essa dimensão, mais enfraquecida fica e a deixa mais próxima da cor neutra (DENT, 2009). A luminosidade ou valor refere-se à quantidade de brilho na cor, consequência direta da energia refletida pelos tons claros e escuros em um mesmo matiz, como por exemplo, o verde claro e verde escuro, sendo que o verde corresponde ao tom da cor e o claro e escuro a variação em luminosidade (MARTINELLI, 2003).

Dada à importância que a variável 'cor' desempenha nos mapas temáticos, Harrower e Brewer (2003) desenvolveram um sistema *online* chamado de *ColorBrewer*, uma ferramenta que permite trabalhar com mais rapidez e confiança, por sugerir esquemas de cores atrativos e ajudar os usuários a escolherem o esquema mais apropriado para aplicar em seu mapa. No total, *ColorBrewer* disponibiliza um conjunto de trinta e cinco esquemas de cores, classificados em três tipos: qualitativo, sequencial e divergente (Figura 3).

O tipo qualitativo é destinado para a representação de dados nominais ou categóricos, possui diferentes matizes com a mesma luminosidade e saturação para criar as principais diferenças visuais entre as classes (Figura 3a). O sequencial é recomendado para dados numéricos ordenados em forma crescente, de baixo para alto, e assim associa cores claras para valores baixos e cores escuras para valores altos (Figura 3b). O divergente é sugerido para valores situados na média, ou em extremos de intervalos de dados. Esse esquema enfatiza as classes com os extremos alto e baixo com cores escuras com matizes contrastantes e as demais com cores claras (Figura 3c).



Figura 3 Esquemas de cores: (a) qualitativo (b) sequencial (c) divergente
 Fonte: Aikes et al. (2021)

3.7 Zonas de manejo

Uma abordagem prática que pode promover a adoção das técnicas de AP é o estabelecimento de zonas de manejo, já que tal metodologia permite utilizar os mesmos sistemas utilizados na agricultura convencional, alterando apenas as dosagens dos insumos aplicados em cada zona de manejo (FRANZEN et al., 2002; XIN-ZHONG, 2009; BAZZI et al., 2013). A retirada de uma única amostra composta de solo por zona de manejo reduz a quantidade de amostras que necessitam ser coletadas para caracterizar as variáveis do sistema de produção e assim, os custos com análises laboratoriais (MULLA et al., 2016; NAWAR et al., 2017).

Zonas de manejo têm como objetivo reduzir a heterogeneidade da variabilidade espacial dos fatores relacionados à fertilidade do solo, aplicando insumos agrícolas com taxa constante, de maneira racional, para atingir a eficiência máxima dos insumos agrícolas e, conseqüentemente, o aumento da produtividade e redução do impacto ambiental (DOERGE, 2000; ZHAO et al., 2013; NAWAR et al., 2017). Logo, ZMs são resultados de um planejamento adequado de uso e ocupação do solo, de áreas passíveis de receber as mesmas práticas agrônômicas, que visam reduzir os impactos do homem sobre o meio ambiente (MIQUELONI et al., 2015).

Podem ser definidas como sub-regiões do campo que possuem combinação homogênea de fatores limitantes da produtividade e da qualidade da cultura, onde se pode aplicar uma dose uniforme de insumos ou de uma mesma prática agrícola (DOERGE, 2000; ZHANG et al., 2002; VRINDTS et al., 2005). Também são definidas como subáreas de um talhão, que possuem características semelhantes (GAVIOLI et al., 2016, BAZZI et al., 2015) e podem ser delineadas com base na variável produtividade ou por vários atributos do solo e plantas que estão diretamente ligados à produtividade da cultura (TAGARAKIS et al., 2013).

Para isso, recomenda-se a utilização de variáveis estáveis e previsíveis ao longo do tempo no delineamento das zonas de manejo, que essas apresentem dependência espacial e que sejam correlacionadas com a produtividade, como exemplos têm-se: topografia (PERALTA et al. 2015; TAGARAKIS et al, 2013), condutividade elétrica aparente do solo (CASTRIGNANÒ et al., 2018; MARTÍNEZ CASASNOVA et al., 2018), propriedades físicas do solo (CARVALHO et al., 2016; GAVIOLI et al., 2016), imagens de satélite (DAMIAN et al., 2020; BREUNIG et al., 2020; ZHANG et al. 2010), experiência do produtor (MARTÍNEZ CASASNOVA, 2018; SCHENATTO et al., 2017), combinação de diversos dados (SUSZEK et al, 2011; BETZEK et al., 2018; SOBJAK et al., 2018; GAVIOLI, 2019) entre outros.

As zonas de manejo dão suporte para uma gestão personalizada da lavoura, sendo importantes no controle de aplicação de insumos (PERALTA et al., 2015, WENDEL, 2019, BENEDUZZI, 2020; SOBJAK, 2021); mapeamento de ervas espontâneas (PEÑA et al., 2013); irrigação (HAGHVERDI et al., 2016; LANDRUM et al., 2014; YARI et al., 2017); mapeamento da produtividade, (FERRAZ et al., 2011; ARNO et al., 2011; BAZZI et al., 2013; CÓRDOBA et al., 2013; CID-GARCIA e RIOS-SOLIS, 2014; PERALTA et al., 2015; TRIPATHI et al., 2015; MULLA et al., 2016; NAWAR et al., 2017; SOBJAK et al.; 2018), entre outros. Esses autores relatam bons resultados com a implementação de zonas de manejo, pois além da economia de custos e tempo, permitiram o gerenciamento de fatores de fertilidade, solo, água e culturas.

O número de zonas de manejo é determinado em função do tamanho da área e da variabilidade espacial do solo, utilizando um algoritmo de classificação, que separa os dados coletados de uma área de amostragem em um número de grupos pré-definidos, apresentando as características semelhantes (FRIDGEN et al., 2004; KITCHEN et al., 2005; TRIPATHI et al., 2015; CÓRDOBA et al., 2016). Neste sentido, alguns protocolos foram propostos com o objetivo de instruir pesquisadores e produtores para delinear zonas de manejo de forma adequada (SANTOS e SARAIVA, 2015; CÓRDOBA et al., 2016; SOUZA et al., 2018).

3.7.1 Delineamento de zonas de manejo

Assim como para a criação de mapas temáticos, Souza et al. (2018) também propuseram um protocolo para o processo de delineamento ZMs (Figura 4), composto por sete etapas: (i) processamento de dados; (ii) normalização de dados; (iii) seleção de variáveis para o delineamento das ZMs; (iv) interpolação de dados, (v) aplicação de um método de agrupamento dos dados, (vi) retificação das ZMs (vii) avaliação das ZMs.

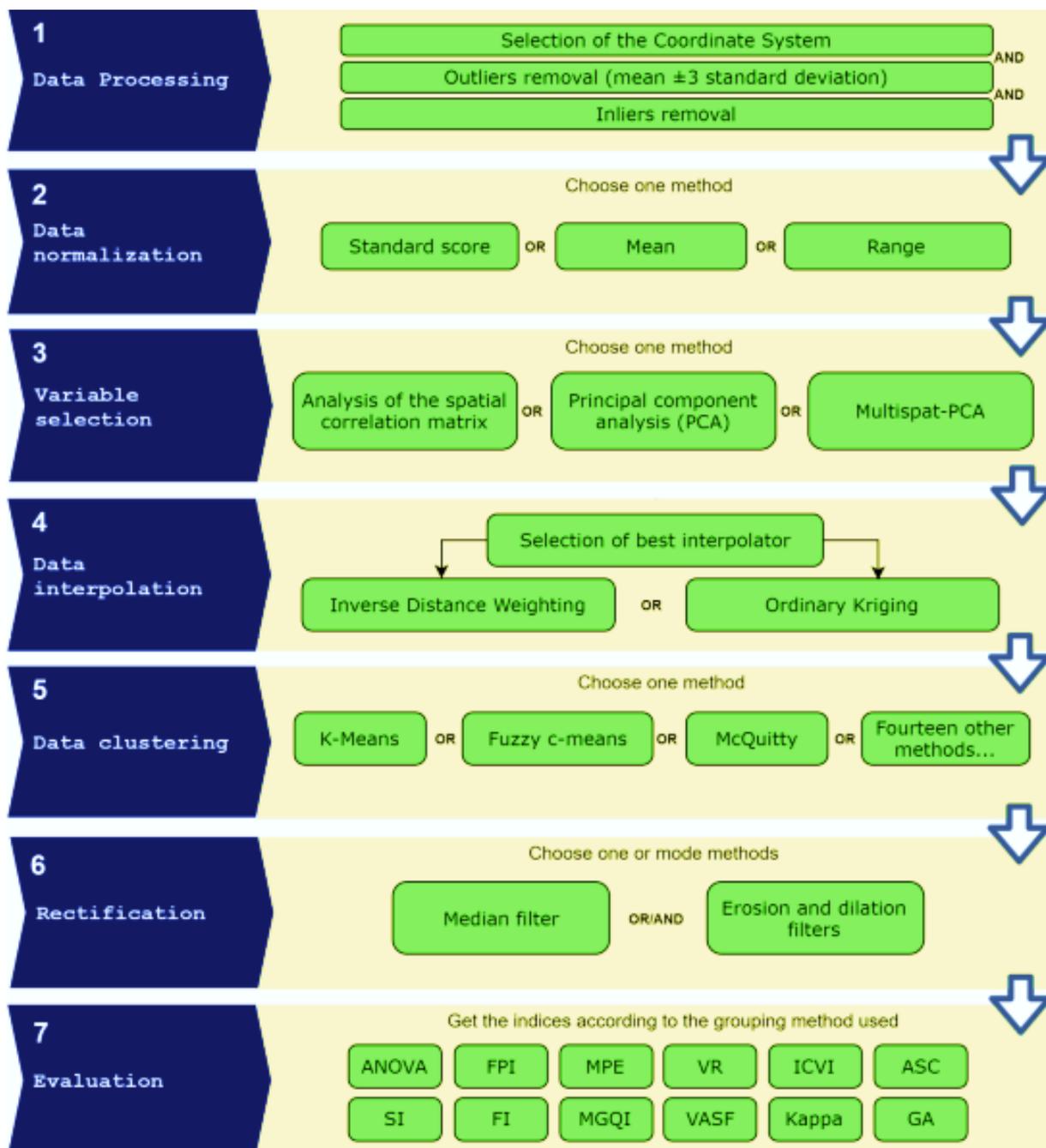


Figura 4 Fluxograma do protocolo típico para delineamento de zonas de manejo
 Fonte: Souza et al (2018)

3.7.1.1 Processamento de dados

Da mesma forma que a primeira etapa do protocolo de criação de MTs (Figura 2), o delineamento de ZMs também se inicia pelo processamento dos dados. Os resultados das análises laboratoriais dos dados coletados em campo devem ser importados para um sistema SIG, com suas respectivas coordenadas de longitude e latitude referenciadas a um sistema de coordenadas, bem como seu *datum*. Posteriormente, os dados devem

passar pelos processos de filtragem e análise exploratória para detectar e remover pontos nulos, duplicados, *outliers* e *inliers*. Desta forma, a base de dados é corrigida, por conseguinte, melhora a qualidade da informação do produto resultante, o mapa das ZMs (CÓRDOBA et al., 2016; MALDANER et al., 2015).

3.7.1.2 Normalização dos dados

A normalização é recomendada, pois, em alguns casos, os dados apresentam características de escalas diferentes, ou ainda a representação dos mesmos não é adequada para a medida da distância empregada no algoritmo de agrupamento escolhido, como a distância euclidiana, que sofre influência das diferentes escalas das variáveis de entrada (MILLIGAN e COOPER, 1988). Para contornar esse problema, faz-se a padronização das variáveis, antes do processo de agrupamento para que essas fiquem como o mesmo peso e dentro do mesmo intervalo, assim, evita-se que as unidades de medida influenciem o agrupamento dos dados (NALDI, 2010).

Schenatto et al. (2017b) avaliaram a influência de três métodos de normalização: o método do desvio padrão, o método da amplitude e o método da média, em dados de produtividade de milho e soja em duas áreas experimentais no Oeste do Paraná. Foram aplicados o algoritmo Fuzzy C Means e a distância euclidiana no agrupamento dos dados e os autores concluíram que o método de amplitude foi o mais adequado. Souza et al (2018) recomendam esses três métodos de normalização para definição de ZMs, sendo o método da amplitude recomendado para normalizar variáveis estáveis. Enquanto os métodos do desvio padrão e o método da média foram aplicados para normalizar a produtividade, com o intuito de remover a variabilidade sazonal e do tipo de cultura. Assim, a normalização compensa tanto as diferenças temporais quanto as diferenças entre culturas e safra, sem afetar seu padrão de distribuição espacial e ainda permitir incluir diferentes culturas na mesma análise (ALCANTARA, 2015).

3.7.1.3 Seleção de variáveis

A escolha das variáveis é uma etapa de extrema importância na definição de ZMs. A produtividade é afetada por diversos fatores como os topográficos, climáticos, edáficos e genéticos. No entanto, nem todos podem ser utilizados de forma prática para aumentar a produtividade das lavouras. Os autores (DOERGE, 2000; KITCHEN et al., 2005; LI et al., 2007; SCUDIERO et al., 2013) recomendam utilizar variáveis estáveis, ou seja, variáveis cujas características não variam significativamente ao longo do tempo

como elevação, declividade, propriedades físicas do solo, textura, condutividade elétrica, índices de biomassa, produtividade histórica e se estiverem relacionadas ao rendimento das culturas, podem ser consideradas confiáveis para definir as ZMs. Portanto, as técnicas de seleção devem considerar somente variáveis com autocorrelação espacial e correlação espacial com a produtividade, ou que podem ser medidas por diferentes métodos estáticos como a análise de correlação espacial, análise de componentes principais e MULTISPATI-PCA.

No entanto, a técnica mais difundida é a análise de correlação espacial, fundamentada na estatística de autocorrelação espacial bivariada de Moran (CZAPLEWSKI e REICH, 1993), que propôs o primeiro coeficiente de autocorrelação espacial, o índice de Moran. Esse mede a autocorrelação espacial global de cada variável em um conjunto de amostras e indica o grau de associação espacial presente no conjunto de dados com variação de -1 a +1, positivo para correlação direta, negativo quando inversa. Desta forma, pela análise de correlação espacial, é possível verificar se as amostras de cada variável apresentam autocorrelação espacial e se este tipo de correlação é significativo entre pares de variáveis (REICH; CZAPLEWSKI e BECHTOLD, 1994).

Após esta análise, pode-se montar uma matriz de correlação espacial, na qual devem constar todos os valores calculados, bem como os valores de autocorrelação. Com base nesta matriz, Bazzi et al. (2013) propuseram um procedimento para selecionar variáveis para o delineamento de ZMs que : (i) elimina as variáveis com autocorrelação espacial não significativa a um dado nível de significância; (ii) remove as variáveis que não apresentaram correlação espacial significativa com a produtividade; (iii) ordena de modo decrescente às variáveis restantes, considerando o módulo do valor da correlação com a produtividade; (iv) elimina as variáveis redundantes (que se correlacionam entre si), dando preferência à exclusão das que apresentarem menor correlação com a produtividade; e (v) por fim, as variáveis restantes são as que podem ser utilizadas por um algoritmo de agrupamento para a definição de ZMs.

3.7.1.4 Interpolação dos dados

Assim como no protocolo de criação de mapas temáticos (Figura 2), os métodos de interpolação de dados IDP, IDQ e KO também são frequentemente aplicados no processo de delineamento de zonas de manejo (SCHETTINI, 2009; SCHENATTO et al., 2016). O método de seleção do melhor interpolador (Figura 4) analisa e seleciona automaticamente o melhor interpolador com base no índice ISI, o que permite aplicar o

interpolador mais adequado para um conjunto de dados e o resultado é um mapa mais preciso (BETZEK et al., 2019; BIER e SOUZA, 2017).

3.7.1.5 Agrupamento dos dados

Análise de agrupamentos de dados é o nome dado ao processo de agrupar ou criar conjuntos com características semelhantes. O objetivo é extrair informações pela divisão de uma área de estudo em regiões homogêneas. Os objetos similares são inseridos em um mesmo grupo com base em uma medida de similaridade e nas características que eles possuem (HAIR; TATHAM e BLACK, 2005). Essa análise utiliza a técnica de aprendizado não supervisionado ao supor que o conjunto de dados não está rotulado e tenta classificar os conjuntos agrupando-os de forma semelhante. É analisada a hipótese de que os objetos no mesmo grupo são mais parecidos entre si do que os de outros grupos (AHMAD e STARKEY, 2017).

É necessário o emprego de um algoritmo que faça a associação das amostras aos grupos para que a análise de agrupamentos seja realizada. Esses podem ser classificados em dois grupos de procedimentos: algoritmos hierárquicos e particionais (DUDA e HART, 1973). Os algoritmos hierárquicos criam uma sequência aninhada de agrupamentos particionais e representam uma estrutura encadeada entre os elementos com maior similaridade dentro do conjunto de dados. Essa representação facilita a visualização da formação dos agrupamentos em cada estágio e o grau de semelhança entre eles (EVERITT, 2001). Os algoritmos de particionamento são baseados na minimização de uma função de custo que consistem em encontrar uma partição com k grupos em uma base de dados com n objetos simultaneamente. Não é imposta uma estrutura hierárquica aos dados, e segue o princípio de que elementos em um mesmo grupo devem ser mais similares do que os elementos pertencentes a grupos diferentes (JAIN e DUBES 1988).

Os algoritmos k -means e fuzzy c -means são os representantes mais populares dos métodos particionais (GAVIOLI, 2017). O algoritmo k -means particiona os dados em k grupos, de forma que os padrões de cada agrupamento fiquem mais próximos do grupo pertencente e mais distante dos padrões dos outros agrupamentos (FUNG, 2001). Fuzzy c -means é uma variação do algoritmo k -means proposto por James C. Bezdek em 1973, que incorpora a lógica fuzzy no processo de análise de agrupamento para determinar a distribuição dos dados nos respectivos grupos, com base em uma medida de distância (AAKER et al., 2001; WINTER, 2005).

Desta forma, este algoritmo possibilita tratar incertezas, ou seja, dados que possuem características de dois diferentes grupos. Utiliza a técnica de aprendizado não supervisionado e calcula a probabilidade com base no grau de pertinência, que um ponto de dado pode pertencer ao grupo (BEZDEK, 1981). Esse processo ocorre de forma iterativa ao atribuir uma associação a cada ponto de dados correspondente a cada centro de grupo com base da distância entre o centro do grupo e o ponto de dados. Sua ideia básica consiste em que o conjunto de dados seja dividido em grupos. Quanto mais os dados estiverem próximos ao centro do grupo, mais será a sua associação ao centro do grupo específico (FRIDGEN et al., 2000; JANRAO et al., 2019).

Fuzzy C-Means é comumente utilizado na definição de ZMs. Rodrigues (2008) e Rodrigues et al. (2011) geraram ZMs em um plantio de café com base no sensor de clorofila utilizando fuzzy c-means. Kitchen et al. (2005), Yan et al. (2007), Molin e Castro (2008), Morari et al. (2009), Iliadis et al., (2010) utilizaram fuzzy c-means na definição de ZMs com base na condutividade elétrica aparente do solo. Bazzi et al. (2013), Schenatto et al. (2016) geraram ZMs utilizando fuzzy c-means com base nos atributos de solo e produtividade. Sobjak et al. (2018) utilizaram fuzzy c-means para verificar variáveis redundantes no processo de delineamento de ZMs. Camicia et al. (2018) avaliaram a eficiência da semeadura à taxa variada para cultura da soja em duas ZMs, as quais foram definidas com base em atributos estáveis e correlacionados com a produtividade, por meio do algoritmo de agrupamento fuzzy c-means e o interpolador krigagem.

Gavioli et al. (2019) avaliaram vinte algoritmos de agrupamento de dados, em que nove eram hierárquicos e onze deles de particionamento com dados obtidos em três áreas agrícolas no delineamento de ZMs. Dentre os vinte algoritmos avaliados, *McQuitty* e *fuzzy analysis clustering* foram considerados os melhores porque apresentaram as maiores reduções de variância da produtividade, geraram classes com alta homogeneidade interna e delimitaram ZMs sem fragmentações nas três áreas experimentais. Os algoritmos *k-means* e *fuzzy c-means* apresentaram resultados semelhantes para duas áreas experimentais.

A correta identificação das zonas de manejo depende da eficiência do algoritmo de agrupamento e, esse por sua vez, depende do tipo de métrica utilizada para a avaliação da medida de distância entre pontos. Medidas de distâncias podem ser definidas como medidas de similaridade e ou dissimilaridade; na qual a primeira é para definir o grau de semelhança entre indivíduos e a segunda é para definir o grau de diferença entre pares (DEZA e DEZA, 2009; FÁVERO et al., 2009). Com base nessas medidas, os indivíduos similares são agrupados e os demais colocados em grupos separados, usando o princípio de que quanto mais próximas estiverem duas instâncias, mais similares elas serão (AAKER et al., 2001; WINTER, 2005).

A estimação das distâncias é baseada no coeficiente de similaridade e dissimilaridade que variam de acordo com tipo de variável estudada, quantitativa ou qualitativa (MEYER, 2002). Esse coeficiente possibilita a comparação objetiva entre as variáveis do conjunto analisado, sendo possível verificar se um elemento A é mais parecido com B do que com C (AAKER et al., 2001). Na medida de similaridade, quanto maior for o valor observado do coeficiente, mais parecidos serão os objetos. Já na medida de dissimilaridade, quanto maior for o valor observado do coeficiente, menos parecidos serão os objetos (MEYER, 2002).

Medidas de distância podem ser utilizadas em diversas situações de agrupamento. Dependendo da métrica utilizada, os algoritmos podem apresentar mudanças significativas em seus resultados como, quando essas medidas são utilizadas para identificação de *outliers*, formato dos grupos na camada de apresentação, e até mesmo na formação de vizinhanças entre os grupos de pontos de dados (CLÉSIO, 2012; ALBUQUERQUE et al., 2016). Portanto, a escolha da medida deve ser feita de acordo com as características dos indivíduos.

Um outro ponto importante destacado por Martins (2005), quando se trata da aplicação de medidas de divergência em métodos de agrupamento de dados, é em relação à invariância à escala dos dados. Esses métodos não devem ser sensíveis a transformações lineares que venham a ocorrer nos dados. Por exemplo, se houver uma mudança de unidade, o algoritmo não deve apresentar modificações nos resultados. Diante disso, é importante que as medidas de dissimilaridade, utilizadas em algoritmos de agrupamento, sejam invariantes pelo menos a transformações lineares. Assim, garante-se que mudanças de unidade, ou escala, não interfiram no resultado final do algoritmo.

Existem diferentes medidas de distância que podem ser aplicadas no processo de agrupamento de zonas de manejo, como as distâncias euclidiana, diagonal e Mahalanobis. A distância euclidiana é aquela entre dois objetos em um espaço métrico, cujas posições são determinadas em relação às suas coordenadas, definidas com referência a um grupo de eixos cartesianos, os quais possuem ângulos retos entre si. Essa distância corresponde à raiz quadrada da soma dos quadrados das diferenças entre os valores de origem (i) e destino (j) para todas as variáveis (BEZDEK et al., 1984).

Essa distância computa dados brutos e não dados normalizados, o que representa certas vantagens. Por exemplo, a distância entre dois objetos quaisquer não é afetada pela adição de novos objetos, ainda que sejam dados fora do padrão. Contudo, as distâncias podem ser afetadas pelas diferentes unidades de medida presentes nos dados analisados (MANLY, 1986). Por exemplo, se no eixo X houver a distância em quilômetros, e no eixo Y a distância estiver em centímetros, no momento em que houver a transformação de escala (ou seja a conversão de centímetros para quilômetros), os

resultados euclidianos (que se baseiam nos quadrados e na raiz) sofrerão uma influência muito grande das dimensões que possuem os maiores valores. Assim, para contornar esse problema com as escalas, recomenda-se normalizar as variáveis em estudo, antes de se obter o valor da distância euclidiana, para que possuam a variância igual à unidade (LIU et al., 2014).

Distância euclidiana é a medida de distância mais conhecida e empregada, quando todas as variáveis são quantitativas, e ela é utilizada para calcular medidas específicas (COSTA, 1999). A rotação e as tranlações são invariantes, porém, elas assumem covariâncias iguais entre as classes e, em geral, não são invariantes às transformações lineares (SEIDEI et al., 2008; PEREIRA et al., 2013). Contudo, essa é a métrica mais utilizada pelos algoritmos de análise de agrupamentos como o fuzzy c-means, que calcula as distâncias entre os objetos aplicando essa métrica (PRADO, 2015).

A distância de Mahalanobis, também conhecida como distância estatística, corrige algumas limitações da distância euclidiana, por considerar as correlações entre as características das variáveis, a partir do cálculo da matriz de covariâncias (ODEH et al., 1992). Mahalanobis não requer normalização inicial dos dados, pois não depende da escala das informações por incorporar a correlação entre os atributos e padronizar cada característica para média zero e variância um. A ideia é associar diferentes pesos a diferentes atributos com base em suas variâncias e a correlação linear entre pares de padrões. A aplicação dessa medida pode minimizar as distorções causadas pelas medidas de correlações lineares entre atributos. É uma ferramenta eficiente para calcular similaridade de duas amostras desconhecidas, pois possui três propriedades importantes: invariância rotacional, invariância translacional e invariância afim ((MCBRATNEY e MOORE, 1985; HUAN et al., 2010).

A Distância Diagonal é insensível a variáveis correlacionadas, assim como a distância euclidiana (Odeh et al., 1992). No entanto, essa distância compensa distorções causadas por disparidade nas variações entre as variáveis medidas, ao considerar os aglomerados esféricos. Tal distância é recomendada para variáveis não correlacionadas com escalas diferentes, por transformar o conjunto de dados para que todos os atributos tenham a mesma variância (BEZDEK, 1981; MCBRATNEY e MOORE, 1985).

Alguns trabalhos já foram realizados com o intuito de avaliar o desempenho das Distâncias euclidiana, Mahalanobis e Diagonal. Zhang et al. (2010) compararam as métricas de distância Diagonal e Mahalanobis utilizando o software ZoneMAP, para definição de ZMs, a partir de dados Landsat. Os autores verificaram que ambas as distâncias resultaram em ZMs semelhantes. No entanto, a distância Diagonal apresentou

um cálculo mais rápido com economia de tempo e o alto custo de processamento computacional.

Guerreiro e Breve (2017) realizaram um comparativo entre as distâncias: Euclidiana, Mahalanobis, City Block, Chebyshev, Minkowski, Bray-Curtis e Canberra na formação de grafos em diferentes bases de dados (*Iris*, *Wine* e *Banknote Authentication*). Contendo 150 instâncias na base *Iris* com quatro variáveis e um total de três classes. A base *Wine* com 178 instâncias, com treze variáveis em cada e um total de três classes, e a base *Banknote Authentication* com 1372 instâncias, quatro variáveis em cada e um total de duas classes. Como resultado, os autores constataram que a distância Mahalanobis foi a melhor métrica para a base *Iris*, *City Block* para a base *Wine* e Euclidiana para a base *Banknote Authentication*.

Mukhopadhyaya et al. (2018) estudaram doze medidas de distância utilizando o algoritmo FCM para avaliar a precisão de um conjunto de dados de imagens Landsat-8 em relação às imagens provenientes do Formosat-2. Nesse estudo, as Medidas de Cosseno e Euclidiana foram as que apresentaram os melhores resultados.

3.7.1.6 Retificação

A retificação dos mapas é uma etapa importante no processo de delineamento de ZMs. Por mais que o algoritmo de agrupamento seja eficiente, podem ficar manchas de pequenos *pixels* ou *pixels* isolados nas zonas de manejo geradas, o que dificulta sua aplicação no campo (BETZEK et al., 2018). Para solucionar esse problema, recomenda-se a aplicação de filtros espaciais. A filtragem espacial refere-se ao processamento digital de imagem que modifica um *pixel* baseado nas informações da sua vizinhança. Assim, imperfeições introduzidas são removidas durante o processo de segmentação (SONKA, HLAVAC e BOYLE, 2014).

Alguns exemplos de filtros que podem ser aplicados no processo de retificação de ZMs são: o filtro de mediana, moda, erosão e dilatação. O filtro de mediana é um filtro estatístico cujo objetivo é eliminar valores de *pixels* discrepantes, pela substituição do valor do *pixel* pela mediana dos valores da vizinhança do *pixel* consultado. O filtro da moda elimina *pixels* isolados e os substitui pelo valor mais frequente em sua vizinhança, ou seja, a moda (ACHARYA et al., 2005; CÓRDOBA et al., 2016). A erosão remove pontos isolados e partículas pequenas, encolhe outras partículas, descarta picos nos limites do objeto e desconecta algumas partículas que não estão contidas no intervalo delimitado de valores. Já a dilatação é um processo complementar à erosão, cujo objetivo

é a expansão de determinados objetos de uma imagem (HE et al., 2016; GONZALEZ e WOODS, 2008).

As operações morfológicas de dilatação e erosão são complementares, de modo que, se aplicar a dilatação seguida por uma erosão, gera-se outro filtro conhecido como abertura, cujo objetivo é eliminar objetos de uma imagem e suavizar contornos dos objetos restantes (GONZALEZ e WOODS, 2008). Quando a ordem é invertida, ou seja, erosão seguida da dilatação, o resultado dessa operação gera outro filtro conhecido como fechamento, que busca restabelecer conexões entre objetos sem modificar radicalmente o tamanho e a forma dos conjuntos de dados (HE et al., 2016). Esses filtros já foram utilizados em vários trabalhos para reduzir a fragmentação das ZMs (BETZEK et al., 2018; ALBORNOZ et al., 2017; CÓRDOBA et al., 2016; GONZALEZ e WOODS, 2008, MOREIRA, 2019; BENEDUZZI, 2020, SOBJAK, 2021).

Assim como os métodos de retificação de ZMs, a máscara de *pixels* também é um fator importante, pois é pelo seu tamanho que se identifica a quantidade de *pixels* que serão considerados na filtragem. Betzek et al. (2018) desenvolveram uma função computacional para analisar o comportamento de cada *pixel* em relação aos seus vizinhos usando duas máscaras 3×3 e 5×5 , e aplicando os filtros mediana e moda. Os melhores resultados foram obtidos com a máscara de 5×5 nos dois métodos de filtragem. Esse resultado corroborou com o estudo de Córdoba et al. (2016) que também apresentaram os melhores resultados após cinco retificações com a máscara 5×5 , a qual suavizou mais as ZMs e proporcionou melhores condições de aplicação operacionais em campo.

3.7.1.7 Avaliação da qualidade de zonas de manejo

A avaliação das ZMs tem como objetivo verificar se a estrutura formada pelo processo de agrupamento é válida, ou seja, se a delimitação das ZMs apresenta diferenças estatisticamente significativas no potencial produtivo das culturas; se cada unidade de ZM pode ser tratada com manejo específico e se pode ser utilizada como fonte de recomendação e de análise para atributos do solo (BAZZI et al., 2015). Para tal validação, Souza et al. (2018) recomendam aplicar diversos critérios tais como análise de variância (ANOVA), teste de comparação de médias de Tukey, índice de desempenho *fuzzy* (*Fuzziness Performance Index* - FPI), índice da partição da entropia modificada (*Modified Partition Entropy* – MPE), índice de redução da variância (*Variance Reduction*, - VR), Índice de Validação de Cluster Melhorado (*Improved Cluster Validation Index* – ICVI), coeficiente de silhueta médio (*Average Silhouette Coefficient* - ASC), índice de

suavidade (*Smoothness index* - SI), índice de fragmentação (IF) e índice global de qualidade modificado (*Modified Global Quality Index* – MGQI).

A ANOVA e o teste de comparação de médias de Tukey podem ser utilizados para verificar se as ZMs geradas a partir do algoritmo de agrupamento apresentam produtividades médias estatisticamente diferentes entre si, em determinado nível de significância. Pela ANOVA, é possível encontrar grupos com amplos valores de variância, prejudiciais à qualidade do mapa de ZMs. Vale ressaltar que a busca é pela sub-região com distribuição normal de probabilidade e que sejam independentes dentro de cada unidade de ZMs (BAZZI et al., 2015). Já pelo teste de Tukey, é possível comparar todos os possíveis pares de médias com base na diferença mínima significativa (PIMENTEL-GOMES, 2000).

Os algoritmos de agrupamentos como o FCM não indicam o número ótimo de agrupamentos para o conjunto de dados analisados, ou seja, o número ótimo de ZMs. Portanto, é necessário avaliar as classificações definidas por algoritmos, com a aplicação de critérios que podem ajudar na avaliação e na tomada de decisão para determinar o melhor número de ZMs, bem como o desempenho geral dos agrupamentos dos dados. Para tal propósito, podem-se utilizar os índices FPI e MPE (SOUZA et al., 2018).

O FPI determina o grau de separação entre os grupos difusos gerados pelo algoritmo de agrupamento FCM a partir de um conjunto de dados, ou seja, mede o quanto os pontos dos dados interpolados estão separados em relação às ZMs. O valor de FPI varia entre 0 e 1, assim, quanto mais próximo for de zero (0), mais distintos são os grupos, com menor grau de compartilhamento de elementos entre os grupos gerados, e quanto mais próximo for de um (1), maior grau de compartilhamento dos membros entre os grupos gerados, indicando não haver classes distintas (ODEH et al., 1992; FRIDGEN et al., 2004; YAO et al., 2014). Já o MPE mede o grau de desorganização criada por um número específico de agrupamentos de dados. Seu valor também varia entre 0 e 1, valores próximos de zero (0) indicam um agrupamento mais organizado, ou seja, o melhor número de ZMs que deve ser escolhido e valores próximos de um (1) indicam que predomina a desorganização (FRIDGEN et al., 2000; BOYDELL e MCBRATNEY, 2002). Depois de avaliada a organização dos dados, pode-se verificar se houve redução de variância nos dados da produtividade ao dividir a área em ZMs em relação à área total. O índice VR calcula o percentual dessa redução, de modo que, quanto maior for seu valor, melhor é o resultado da definição das ZMs, o que auxilia na escolha do melhor mapa a ser utilizado (SOBJAK et al., 2016).

Segundo Fridgen et al. (2004), o número ideal de classes para um conjunto de dados é baseado no valor mínimo de FPI, MPE e máximo de VR (FRIDGEN et al., 2004). No entanto, esses índices podem indicar diferentes agrupamentos como a melhor

solução. Gavioli et al. (2016) propuseram o ICVI composto por FPI, MPE e VR que indica o número ideal de classes para a divisão das ZMs. Esse índice varia entre 0 e 1, de modo que o agrupamento que apresentar o menor ICVI será considerado como o melhor método de divisão de classes (GAVIOLI et al., 2016). O coeficiente ASC também fornece subsídio na escolha de um número ótimo de grupos. Este critério de avaliação mede a qualidade da formação interna e da separação externa entre os grupos, com base no coeficiente de silhueta. Os valores de ASC variam entre -1 e 1, tal que -1 indica um agrupamento incorreto e um (1) indica grupos com as melhores formações possíveis (ROUSSEEUW, 1987).

A avaliação do aspecto visual também deve ser realizada nos mapas de ZMs, pois sua interpretação facilita a aplicação em taxa variada de insumos agrícolas. Neste contexto, está a suavidade das curvas de contorno, que pode ser avaliada pelo índice SI. Este índice calcula a frequência da mudança de classes nos mapas de ZMs, nas direções horizontais, verticais e diagonais, *pixel* por *pixel*. Um mapa terá um índice de suavidade de 100% quando ele não apresentar mudanças de classe, ao contrário, seu SI conterá valores próximos de zero (GAVIOLI et al., 2016). Outro índice que tem relação com o aspecto visual é o IF, pois calcula o número percentual de ZMs em comparação com o número das classes. Quanto maior o IF, maior a fragmentação (SOUZA et al., 2021).

Sobjak (2021) adaptou o índice de qualidade global de Beneduzzi, (2020) que também indica o melhor número de classes para divisão das ZMs, com base nos valores de ICVI, SI retificado e IF retificado. Contudo, MGQI além de utilizar esses índices também inclui o índice ASC. Assim, quanto menor for o valor de MGQI (próximo a zero), quanto maior for a suavidade do mapa retificado, quanto menor a fragmentação do mapa retificado e quanto menor for o valor de ICVI, este corresponderá à melhor quantidade de classes para o delineamento das zonas de manejo (SOBJAK, 2021).

3.7.1.7.1 Comparação entre mapas temáticos e zonas de manejo

Outro aspecto de qualidade que deve ser avaliado após a geração das zonas de manejo é a acurácia dos mapas temáticos, ou seja, o quanto as informações representadas nos mapas estão de acordo com a realidade do campo. Por mais que a metodologia utilizada na classificação seja eficaz, os mapas oriundos desse processo podem conter erros temáticos, que devem ser estimados, a fim de medir a eficiência do classificador adotado e determinar o grau de erro do produto final. Assim, a acurácia dos mapas consiste em um processo de mensuração dos dados, que tem como objetivo a comparação entre mapas obtidos por diferentes metodologias. A base fundamental dessa

avaliação de precisão é uma comparação de localização específica entre o mapa temático gerado e a condição do terreno, também chamada de dado de referência (FOODY, 2002; STEHMAN, 2000).

Para tal comparação, Souza et al. (2018) recomendam a técnica da matriz de erros ou matriz de confusão. Trata-se de uma maneira eficaz de apresentar os resultados da classificação do mapa, por apresentar os conflitos entre as classes, pelas correlações das informações dos dados assumidos como referência com os dados classificados, além de determinar não somente o erro global da classificação para cada classe, mas também como ocorreram as confusões entre elas (CONGALTON e GREEN, 2009).

Na matriz de confusão normalmente as colunas representam os dados de referência, ou seja, verdade de campo e as linhas representam a classificação obtida pelo algoritmo de agrupamento utilizado. Cada célula da matriz apresenta o valor do dado que deveria ser classificado como a classe especificada na linha e que foi classificado segundo a classe especificada na coluna. Na diagonal principal, a matriz apresenta somente os elementos classificados corretamente e fora dela os elementos classificados incorretamente. A coluna marginal apresenta o total de elementos classificados para uma classe. Já a linha marginal representa o total de elementos de referência amostrados para classe (CENTENO, 2009).

A partir da construção da matriz de confusão, podem-se obter medidas de acurácia, como os coeficientes de concordância e os mais utilizados são a exatidão global e o Kappa. A exatidão global é a maneira mais comum para expressar a precisão na comparação de mapas. É calculada dividindo-se a soma dos valores da diagonal principal, que representa o número de pontos classificados corretamente pelo número total de pontos amostrais utilizados (BACH et al., 2006). Porém, apenas o cálculo da exatidão global não é suficiente, pois essa medida considera apenas a diagonal principal da matriz de erros e ignora a ocorrência de concordância casual entre as classes (BRITES et al., 1996). O coeficiente Kappa considera todos os elementos da matriz de erros ao invés de apenas aqueles que se situam na diagonal principal da mesma, ou seja, estima a soma da coluna e as linhas marginais. Assim, este coeficiente avalia o grau de concordância entre as classes geradas e a referência adotada para a estimativa de exatidão. Assume um valor máximo igual a um (1), o qual representa maior correspondência entre as classes dos mapas comparados (COHEN, 1960). Geralmente, ele é classificado de acordo com Landis e Koch, (1977): $0 < \text{Kappa} \leq 0,2$: sem concordância; $0,2 < \text{Kappa} \leq 0,4$: ruim; $0,4 < \text{Kappa} \leq 0,6$: moderado; $0,6 < \text{Kappa} \leq 0,8$: forte; $0,8 < \text{Kappa} \leq 1$: excelente.

3.8 Plataforma digital AgDataBox

O Software para Definição de Unidades de Manejo (SDUM), desenvolvido por Bazzi et al. (2013) em ambiente *desktop*, com capacidade de gerar mapas temáticos, zonas de manejo e avaliá-las, mostrou ser adequado e teve boa aceitação dos seus usuários. Contudo, a necessidade de instalação em computadores, alta capacidade de processamento e disponibilidade de memória motivaram sua migração para uma versão por compor uma plataforma *web* denominada *AgDataBox*, com novos módulos e funcionalidades como interpolação por krigagem, técnicas de seleção de variáveis, novos métodos de agrupamento de dados para definição de zonas de manejo e retificação dos mapas temáticos gerados das zonas de manejo (BETZEK et al., 2018; GAVIOLI, 2017; SCHENATTO et al., 2017; FONTANA, 2017; SCHENATTO, 2014; BORGES et al., 2020).

A plataforma ADB é disponibilizada de forma gratuita e fornece diversos recursos aos agricultores, agrônomos, pesquisadores e interessados, voltados à agricultura de precisão que, pela integração de diferentes fontes de dados, softwares, procedimentos, metodologias e dispositivos, tem como objetivo contribuir com o aumento da produtividade das culturas do nosso país. A Figura 14 ilustra sua arquitetura com os módulos já incorporados: ADB-Mobile, ADB-Map, ADB-Admin, ADB-IoT, ADB-DataMining, e outros estão em desenvolvimento (Figura 5).

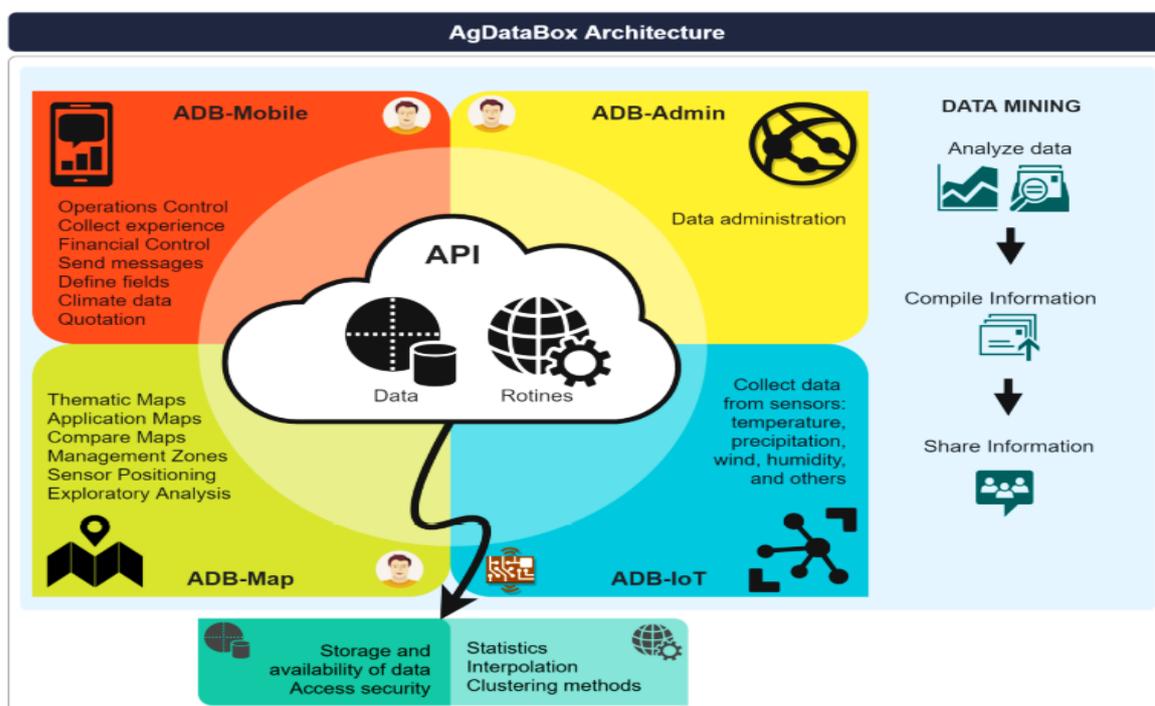


Figura 5 Arquitetura da plataforma digital AgDataBox
Fonte: Sobjak (2021)

O módulo ADB-Mobile disponibiliza uma aplicação móvel para coleta e gestão de dados para os agricultores, desenvolvido para dispositivos móveis com sistema operacionais *Android* (SCHENATTO et al., 2017), (Figura 6).

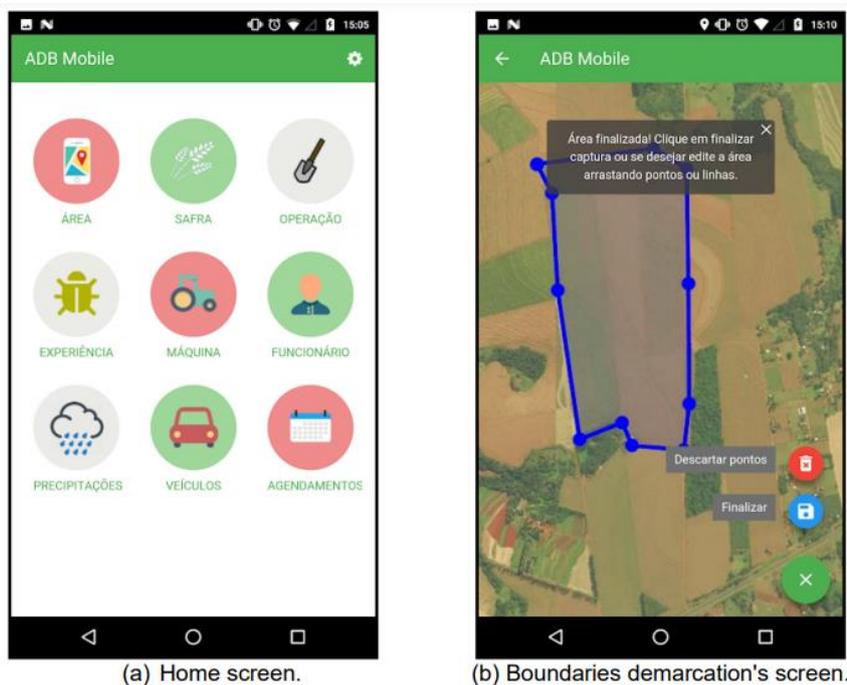


Figura 6 ADB-Mobile, interface administrativa (a) e interface de demarcação do contorno da área
Fonte: Sobjak (2021)

O módulo ADB-Admin é um aplicativo que administra os recursos oferecidos pela ADB-API para gerenciar dados agrícolas armazenados em nuvem (Figura 7).

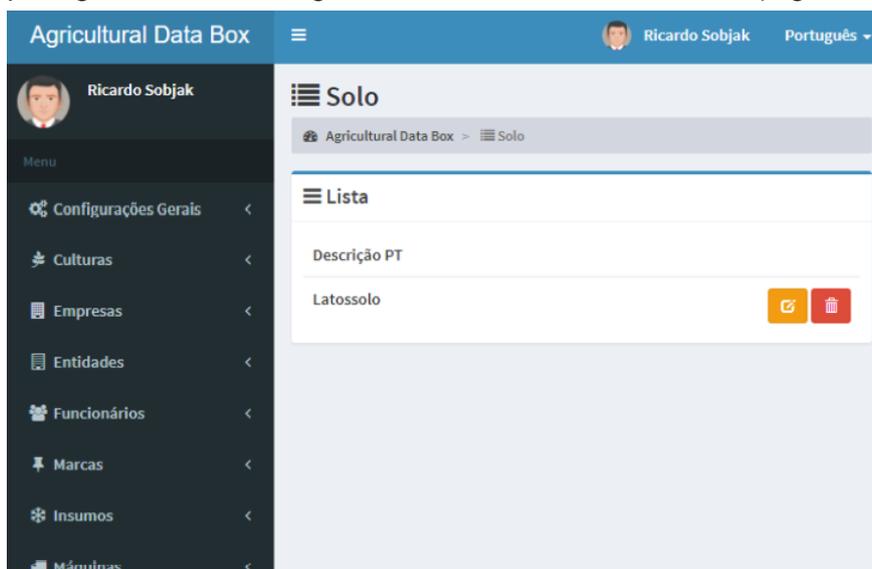


Figura 7 Interface do ADB-Admin
Fonte: Sobjak (2021)

O módulo ADB-IoT tem como objetivo projetar redes de sensores interconectados para monitoramento hídrico e climático em zonas de manejo (Figura 8).

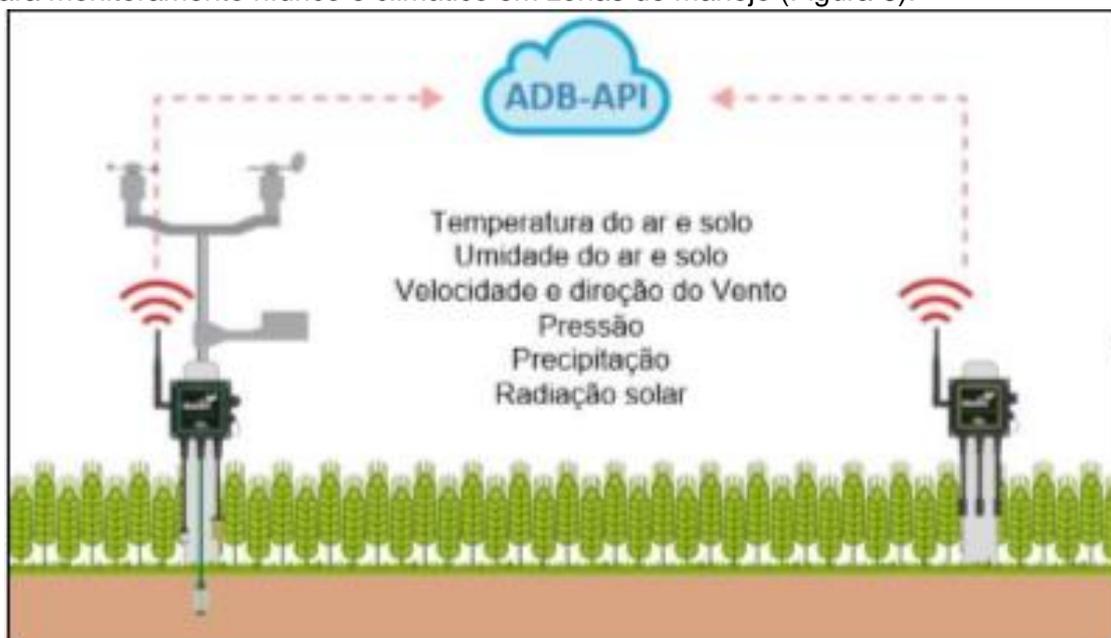


Figura 8 Representação da disposição de sensores em campo conectados com a ADB-API

Fonte: Souza et al. (2018)

O módulo ADB-DataMining reconhece padrões em conjuntos de dados, por meio de aprendizado de máquina, análise de agrupamento e sistemas de banco de dados (Figura 9).



Figura 9 Representação ADB-DataMining

Fonte: Souza et al. (2018)

A plataforma ADB disponibiliza a aplicação ADB-API responsável por centralizar, armazenar, gerenciar e compartilhar os dados, como mapas temáticos e gestão da área agrícola, via *web* a partir de vários módulos: Essa aplicação dispõe de um ambiente que permite interagir com diferentes aplicativos em um único local de forma centralizada (mas modular). Ela ajuda e facilita o trabalho de desenvolvedores de software que podem tirar proveito de recursos complexos implementados no API.

O módulo ADB-Map permite a criação de mapas temáticos e o delineamento de zonas de manejo em agricultura de precisão a partir de um conjunto de dados (MICHELON et al., 2019; SOBJAK, 2021). ADB-Map disponibiliza diversos recursos, tais

como: importação e exportação de dados, análise estatística, limpeza de dados, normalização de dados, interpolação de dados pelos métodos KRI e IDW, criação de mapas temáticos, diversos métodos para seleção de variáveis para o delineamento de zonas de manejo, definição das zonas de manejo por diversos métodos de agrupamentos, retificação e vários critérios para avaliação das zonas de manejo geradas, recomendação de fertilizantes e de calcário (Figura 10).

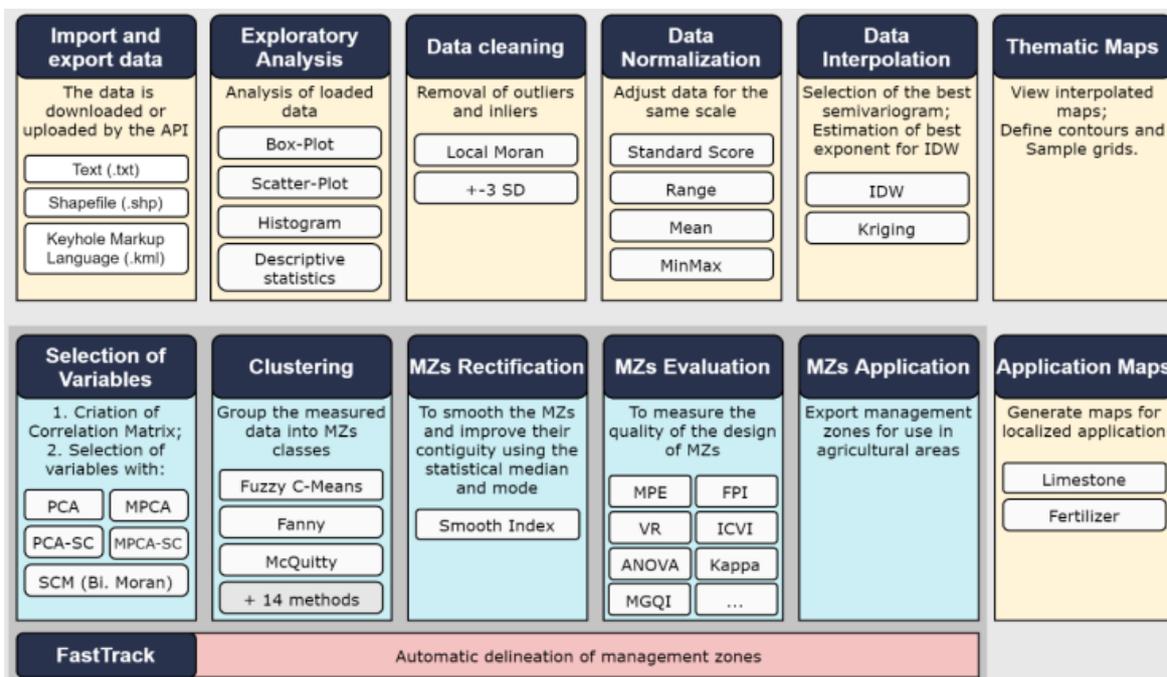


Figura 10 Organização dos módulos que compõe a aplicação ADB-Map
Fonte: Sobjak (2021)

O módulo de recomendação de fertilizantes AgDataBox-Map-ApplicNutrient foi desenvolvido por Beneduzzi (2020), e está integrado e disponibilizado na plataforma AgDataBox-Map por Sobjack (2021). Para a recomendação de N, na cultura do milho, Beneduzzi (2020) desenvolveu o método EPMO: Expectativa de Produtividade que considera o teor de Matéria Orgânica (MO%) do solo. No qual, as faixas de recomendação são baseadas na expectativa de produtividade e no resíduo das culturas cultivadas anteriormente (gramíneas ou leguminosas). Para P e K, o autor desenvolveu dois métodos de recomendação: disponibilidade (D) que considera o teor do nutriente disponível no solo e seu tipo granulométrico (argiloso ou arenoso), e a expectativa de produtividade (EP) que considera a produtividade esperada das culturas (soja e milho) e o teor de argila (g kg^{-1}) presente no solo. A recomendação destes nutrientes são baseadas no Manual de Adubação e Calagem do estado do Paraná (PAULETTI e MOTTA, 2017), o qual fornece informações para a definição de doses variadas e estratégias de aplicação dos nutrientes para as culturas de soja e milho. Pelo AgDataBox-Map-ApplicNutrient pode ser realizada a recomendação de NPK para

aplicação com diferentes fertilizantes (Tabela 6).

Tabela 6 Fertilizantes disponíveis para a recomendação dos nutrientes na AgDataBox-Map-AplicNutrient

| Nutrientes | Culturas | Métodos | Fertilizantes |
|------------|--------------|---------|---|
| N | Milho | EPMO | Ureia Sulfato de amônio Nitrato de amônio Cloreto de amônio |
| P | Soja e Milho | D e EP | Superfosfato simples Superfosfato triplo Fosfato monoamônico Fosfato diamônico Fosfato de Araxá |
| K | Soja e Milho | D e EP | Cloreto de potássio Sulfato de potássio Sulfato de potássio e magnésio Salitre duplo potássico |

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Áreas experimentais

A pesquisa foi realizada com dados obtidos em duas áreas agrícolas comerciais, localizadas na região Oeste do Paraná, Brasil (Figura 11). A área A possui 20,9 ha, e está localizada no município de Serranópolis do Iguaçu, com localização geográfica central de $25^{\circ}24'28''\text{S}$ e $54^{\circ}00'17''\text{O}$ e altitude média de 355 metros. Essa área tem sido manejada com a sucessão das culturas de soja e milho, sob sistema de plantio direto desde 1997. Já a área B tem 15,5 ha, e está localizada no município de Céu Azul, com coordenadas geográficas centrais de $25^{\circ}06'32''\text{S}$ e $53^{\circ}49'55''\text{O}$ e elevação média de 460 metros. Tem o mesmo sistema de plantio e é cultivada com a sequência de soja, trigo, milho e aveia desde 1993. O solo da região é classificado como Latossolo Vermelho Distroférico típico argiloso (EMBRAPA, 2013).

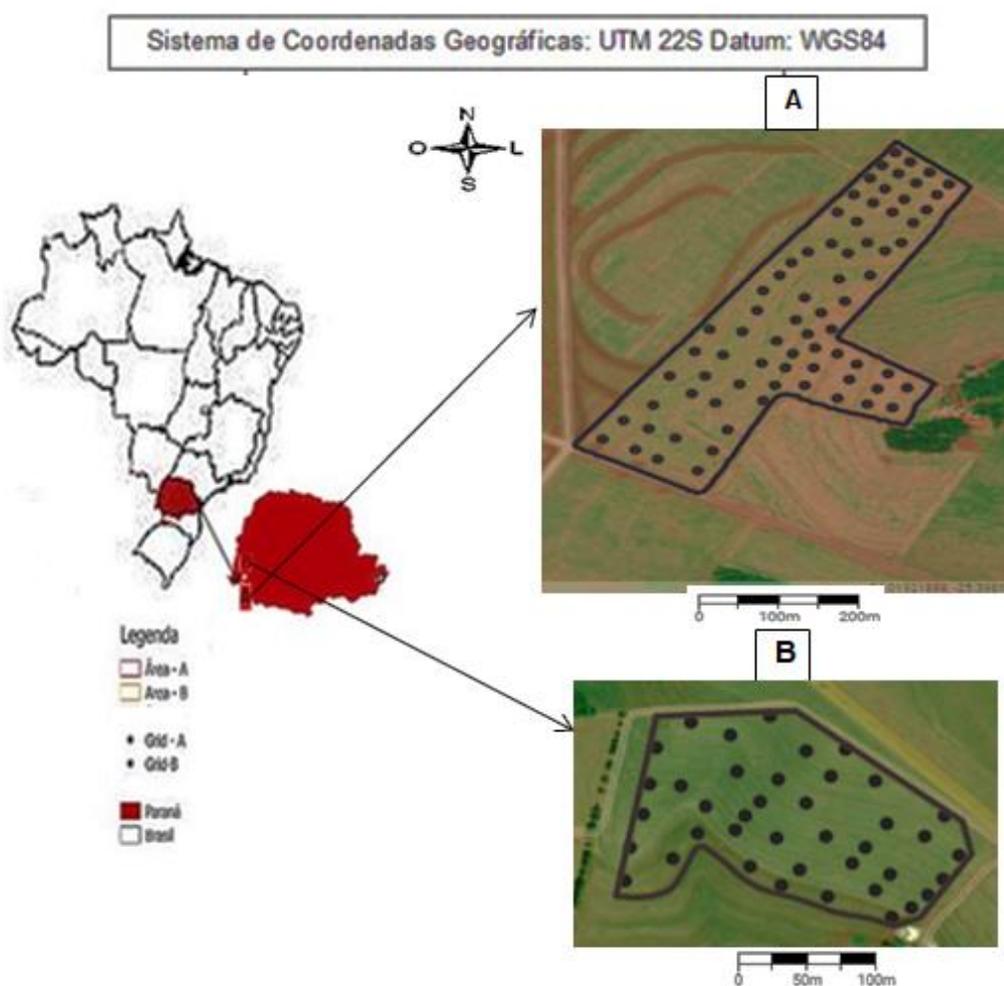


Figura 11 Áreas experimentais com a distribuição dos pontos amostrais

O clima da região de acordo com a classificação de Köppen (1928) e Aparecido (2016) é do tipo Cfa, subtropical úmido, com verões quentes, invernos com possibilidade de geadas e sem estação seca. No município de Serranópolis do Iguçu onde está localizada a área A, a temperatura média anual (Figura 12) dos anos estudados ficou acima dos 22 °C, com precipitação acumulada total anual média acima de 150,00 mm ano⁻¹.

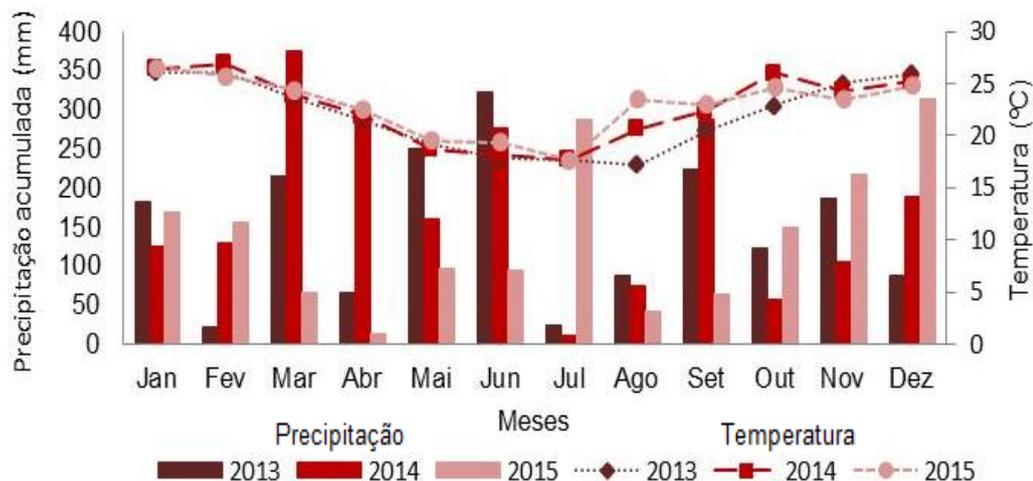


Figura 12 Médias mensais de precipitação pluviométrica e temperatura os anos 2013, 2014 e 2015 do município de Serranópolis do Iguçu- PR
Fonte: Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR)

Já no município de Céu Azul, onde está localizada a área B, a temperatura média anual (Figura 13), em relação aos anos de pesquisa, ficou acima dos 20 °C, com precipitação acumulada total anual média acima de 180,00 mm ano⁻¹.

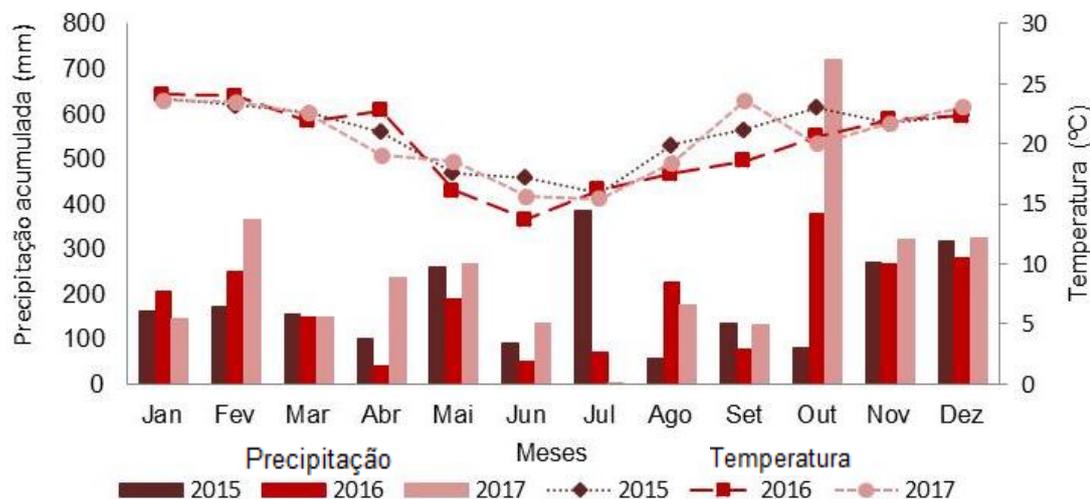


Figura 13 Médias mensais de precipitação pluviométrica e temperatura dos anos 2015, 2016 e 2017 do município de Céu Azul-PR
Fonte: Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR)

4.2. Coleta dos dados

O receptor GNSS (*Geo Explorer XT 2005*, *Trimble Navigation Limited*, Sunnyvale, CA, EUA) foi utilizado para o mapeamento do contorno das áreas, e o *software Pathfinder* (*Trimble Navigation Limited*, Sunnyvale, CA, EUA) foi utilizado para a geração das grades amostrais. Por se tratar de áreas que possuem grau de declividade e várias curvas de nível, optou-se por utilizar grades amostrais irregulares com distância mínima de 40 metros. A área A ficou com 73 pontos, densidade amostral de 3,5 pontos ha⁻¹ e área B ficou com 40 pontos, densidade amostral de 2,6 pontos ha⁻¹, valores superiores à recomendação de Journel e Huijbregts (1978).

Nas duas áreas experimentais, a amostragem de solo foi realizada de acordo com as recomendações do manual de garantia de qualidade (SCHENATTO, 2016) do Laboratório de Agricultura Mecanização Agrícola e Agricultura de Precisão (LAMAP). Desse modo, para determinar os atributos químicos do solo, em cada ponto amostral, foram realizadas oito perfurações (sub-amostras), duas por quadrante, em um raio de três metros do ponto central, na profundidade de 0-0,2 metro, para formar uma amostra composta, utilizando um perfurador de solo (Stihl BT 45, STIHL Ferramentas Motorizadas Ltda, São Leopoldo, PR, Brasil).

A resistência do solo à penetração (RSP) foi determinada por meio de um penetrógrafo Falker PGL 1020. Foram realizadas quatro medições no entorno do ponto amostral, uma por quadrante, na camada de 0,0 a 0,40 metro. Posteriormente, foram extraídos os valores médios referentes às camadas de 0-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,30 metro. Para a altitude, foi utilizada uma estação total eletrônica Topcon GPT-7505. Definida a elevação, calculou-se então a declividade em função de cada ponto amostral, a partir do *software Surfer 10*.

A produtividade de soja e milho foi determinada por colheita manual na área A. Já na área B, o rendimento das culturas foi medido com um monitor de colheita CASE AFS PRO 600 acoplado em uma colhedora CASE modelo 2388. O arquivo gerado pelo monitor de colheita foi convertido pelo programa AFS CASE. Posteriormente, todos os dados foram corrigidos para o teor água de 13%, a fim de reduzir a variabilidade temporal dos dados, visto que são fortemente influenciados pelos fatores climáticos e pela precipitação pluviométrica. Todos os atributos utilizados no estudo estão descritos na Tabela (7).

Tabela 7 Atributos utilizados e período de coleta em cada área experimental

| Atributos | Área A | | | | Área B | | | |
|-----------------------------------|--------|------|------|------|--------|------|------|------|
| | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2012 | 2015 | 2016 | 2017 |
| N(MO) | | X | X | X | | X | X | X |
| P | | X | X | X | | X | X | X |
| K | | X | X | X | | X | X | X |
| pH | | X | X | X | | X | X | X |
| Altitude (m) | X | | | | X | X | | |
| Declividade (°) | X | | | | X | X | | |
| Areia (%) | X | | | | | | X | |
| Argila (%) | X | | | | | | X | |
| Silte (%) | X | | | | | | X | |
| RSP 0,0 – 0,1 m (MPa) | | X | | X | | X | | |
| RSP 0,1 – 0,2 m (MPa) | | X | | X | | X | | |
| RSP 0,2 – 0,3 m (MPa) | | X | | X | | X | | |
| Prod. milho (t ha ⁻¹) | | X | X | X | | X | | X |
| Prod. soja (t ha ⁻¹) | | X | X | X | | X | | X |

4.3 Mapas temáticos

A precisão de um mapa temático depende da aplicação de uma metodologia adequada para sua criação. Por isso é importante seguir um protocolo específico como o de Souza et al. (2018). Desse modo, todas as etapas do processo de criação dos mapas temáticos (Figura 14) foram realizadas como base neste protocolo utilizando a plataforma AgDataBox.

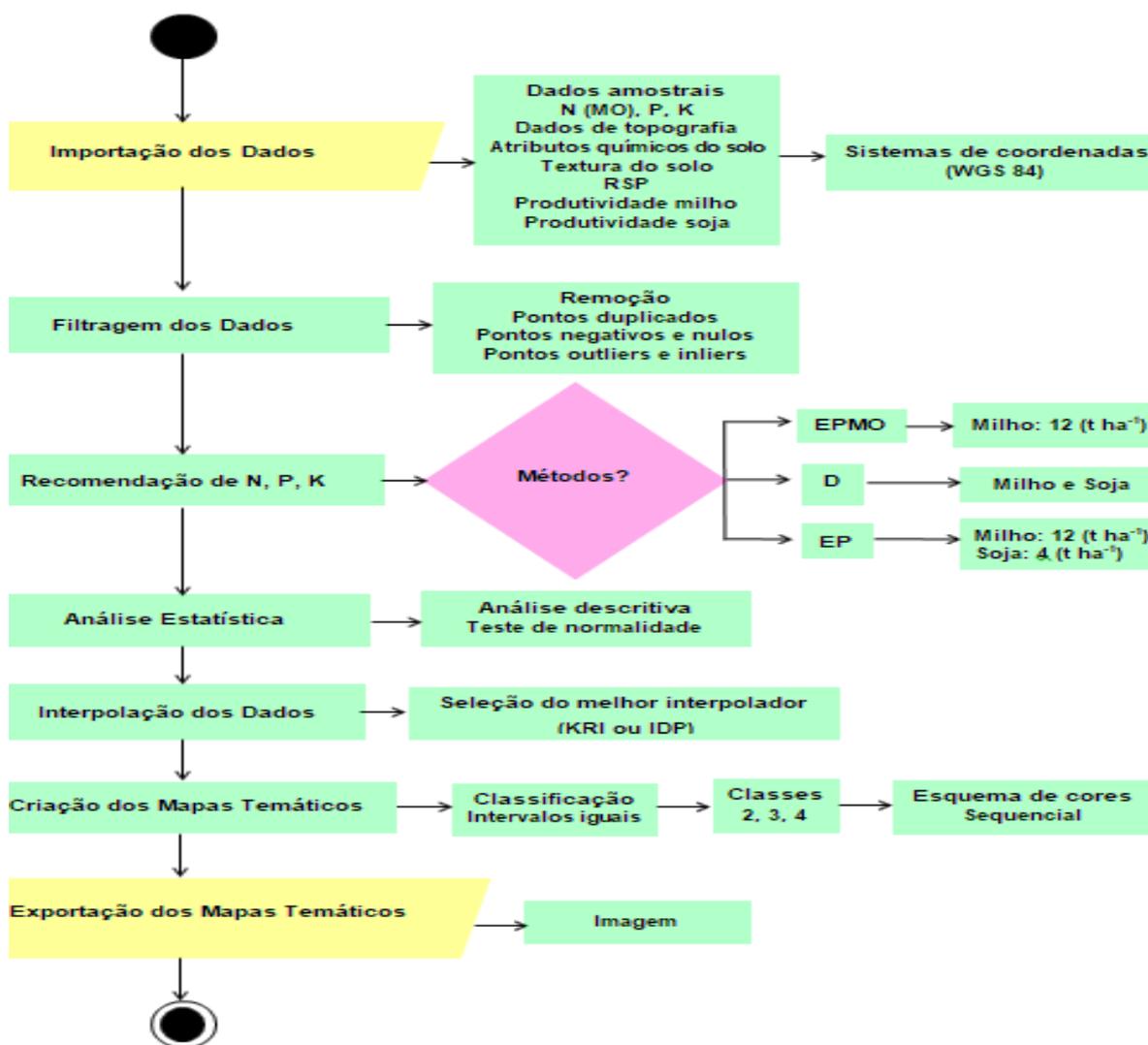


Figura 14 Etapas realizadas para criação dos mapas temáticos

- **importação dos dados:** nesta etapa, todos os dados obtidos de N (MO), P, K, pH, topografia (altitude e declividade), textura do solo (areia, argila e silte), resistência do solo à penetração (RSP) (0,0 – 0,1, 0,1 – 0,2, 0,2 – 0,3 m), produtividade do milho e produtividade da soja foram inseridos em arquivos de texto (.txt) contendo três colunas, as quais correspondem às respectivas coordenadas geográficas de longitude (X) e latitude (Y) mais o valor de cada atributo amostrado (Z). Posteriormente, os arquivos foram importados para a plataforma ADB, utilizando o sistema de coordenadas cartesianas Universal Transversal de Mercator (UTM), associado ao sistema geodésico de referência World Geodetic System 1984 (WGS84), os quais permitem identificar a posição de determinado ponto na superfície da Terra e suas correspondências no plano de projeção do mapa;
- **filtragem dos dados:** a filtragem dos dados é uma prática adotada para eliminar vários tipos de erros, sejam eles oriundos de coletas indevidas ou erros de

medição por parte dos sensores. Assim, para remover esses tipos de erros, os quais prejudicam a qualidade das informações contidas nos mapas resultantes, os dados foram filtrados de forma automática pelo módulo de limpeza de dados. Este módulo permite retirar pontos duplicados, negativos, nulos, *outliers* (ponto fora do intervalo \pm três desvio padrão) (CÓRDOBA et al., 2016) e *inliers* (pontos diferentes significativamente de seus vizinhos) (AIKES JUNIOR et al., 2021);

- **recomendação de NPK:** Pelo módulo de recomendação de fertilizantes AgDataBox-Map-AplicNutrient, foram realizadas as recomendações de NPK. Para a recomendação de N na cultura do milho, foi utilizado o método EPMO: Expectativa de Produtividade que considera o teor de Matéria Orgânica (MO%) do solo. Neste método, as faixas de recomendação são baseadas na expectativa de produtividade e no resíduo das culturas cultivadas anteriormente (gramíneas ou leguminosas). Para P e K, os métodos de recomendação utilizados foram: disponibilidade (D) que considera o teor do nutriente disponível no solo e seu tipo granulométrico (argiloso ou arenoso) e a expectativa de produtividade (EP) que considera a produtividade esperada das culturas (soja e milho) e o teor de argila (g kg^{-1}) presentes no solo. Assim, as recomendações de N para o cultivo do milho foram geradas pelo método EPMO com base no teor da MO, nos resíduos da leguminosa, considerando a expectativa de produtividade, utilizando a ureia como fertilizante. As recomendações de P e K foram realizadas para as culturas de soja e milho, utilizando os dois métodos D e EP. Foram considerados teores dos nutrientes disponíveis no solo no método D, com tipo granulométrico argiloso. Já no método EP, considerou a produtividade esperada das culturas e o teor de argila (g kg^{-1}) presente no solo. O fertilizante utilizado na recomendação de P foi o superfosfato simples e na recomendação de K, foi aplicado cloreto de potássio. Neste estudo, as recomendações de N-P-K foram realizadas para expectativas de produtividade de milho (12 t ha^{-1}) e (4 t ha^{-1}) P e K para a soja. Na Tabela 8, constam as equações disponíveis no módulo *AplicNutrient* para os cálculos da recomendação de N para a cultura do milho, utilizadas no método EPMO. A Tabela 9 apresenta as equações disponíveis para os cálculos da recomendação de P para as culturas de soja e milho, utilizadas pelos métodos D e EP. E, na Tabela 10, estão descritas as equações disponíveis para os cálculos da recomendação de K para as culturas de soja e milho, utilizadas pelos métodos D e EP. As equações destacadas na cor cinza foram utilizadas nas recomendações deste trabalho.

Tabela 8 Metodologia utilizada para cálculos das recomendações de nitrogênio (N) na cultura do milho

| Nutriente | Método | Cultura | | Quantidade Recomendada Calculada (Kg ha ⁻¹) | Quantidade Efetiva Recomendada (Kg ha ⁻¹) |
|-----------|--------|-----------|------------|--|---|
| | | Posterior | Anterior | | |
| N | EPMO | Milho | Gramínea | $N_{cal} = (23.5 * EY - 89.5 - MO/F_{Conv}) / C_{Ef}$ (Eq. 1) | Se $N_{cal} < 80$, $N_{rec} = 80$ Se $80 < N_{cal} < 340$, $N_{rec} = N_{cal}$ Se $N_{cal} > 340$ então $N_{rec} = 340$ |
| | | Milho | Leguminosa | $N_{cal} = (19.9 * EY - 115.3 - MO/F_{Conv}) / C_{Ef}$ (Eq. 2) | Se $N_{cal} < 20$, $N_{rec} = 20$ Se $20 < N_{cal} < 280$, $N_{rec} = N_{cal}$ Se $N_{cal} > 280$ então $N_{rec} = 280$ |

N_{cal} : Quantidade de N calculada pelo modelo de recomendação (kg ha⁻¹); F_{Conv} : fator de conversão de MO para N; C_{Ef} : coeficiente de eficiência que indica o aproveitamento da dose de N aplicada na cultura; N_{rec} : Quantidade de N recomendada respeitando os parâmetros de taxa mínima e máxima considerados no modelo de recomendação; As equações utilizadas neste trabalho estão destacadas em cinza.
Fonte: Beneduzzi (2020)

Tabela 9 Metodologia utilizada para cálculos das recomendações de fósforo (P) nas culturas soja e milho

| Nutriente | Método | Cultura | Solo | Quantidade recomendada calculada (Kg ha ⁻¹) | Quantidade efetiva recomendada (Kg ha ⁻¹) |
|-----------|----------------|----------|--|--|---|
| D | Soja | Argiloso | | $P_2O_5cal = 117.86 - 8.5714 * P$ (Eq. 3) | Se $P_2O_5cal < 55$, $P_2O_5rec = 55$ |
| | | | | | Se $55 < P_2O_5cal < 95$, $P_2O_5rec = P_2O_5cal$ |
| | | Arenoso | | $P_2O_5cal = 4.0364 * P - 111.55$ (Eq. 4) | Se $P_2O_5cal < 60$, $P_2O_5rec = 60$ |
| | | | | | Se $60 < P_2O_5cal < 100$, $P_2O_5rec = P_2O_5cal$ |
| | Milho | Argiloso | | $P_2O_5cal = 7.5387 * P - 111.55$ (Eq. 5) | Se $P_2O_5cal < 40$, $P_2O_5rec = 40$ |
| | | | | | Se $40 < P_2O_5cal < 105$, $P_2O_5rec = P_2O_5cal$ |
| | | Arenoso | | $P_2O_5cal = 1.1838 * P - 75.035$ (Eq. 6) | Se $P_2O_5cal < 35$, $P_2O_5rec = 35$ |
| | | | | | Se $35 < P_2O_5cal < 80$, $P_2O_5rec = P_2O_5cal$ |
| P | EP | Soja | TA < 250 | $P_2O_5cal = 36.79354 - 3.27592 * P - 0.02987 * P^2 + 23.13047 * EY + 0.19904 * EY^2 + 0.08623 * (P * EY)$ (Eq. 7) | Se $P_2O_5cal < 20$, $P_2O_5rec = 20$ |
| | | | 251 < TA < 400 | $P_2O_5cal = 35.39482 - 5.85008 * P - 0.01333 * P^2 + 25.6508 * EY + 0.15527 * EY^2 + 0.14826 * (P * EY)$ (Eq. 8) | Se $20 < P_2O_5cal < 120$, $P_2O_5rec = P_2O_5cal$ |
| | | TA > 400 | $P_2O_5cal = 52.11405 - 6.3362 * P - 0.03471 * P^2 + 14.46979 * EY + 1.51978 * EY^2 + 0.09533 * (P * EY)$ (Eq. 8) | Se $P_2O_5cal > 120$ então $P_2O_5rec = 120$ | |
| | | Milho | TA < 250 | $P_2O_5cal = 82.3474 - 1.64407 * P - 0.09784 * P^2 + 5.0629 * EY + 0.00639 * EY^2 + 0.08561 * (P * EY)$ (Eq. 9) | Se $P_2O_5cal < 20$, $P_2O_5rec = 20$ |
| | 251 < TA < 400 | | $P_2O_5cal = 85.07469 - 3.98038 * P - 0.08584 * P^2 + 5.35295 * EY + 0.00483 * EY^2 + 0.09985 * (P * EY)$ (Eq. 10) | Se $20 < P_2O_5cal < 190$, $P_2O_5rec = P_2O_5cal$ | |
| | TA > 400 | | $P_2O_5cal = 82.41983 - 3.37676 * P - 0.35008 * P^2 + 5.0348 * EY + 0.00743 * EY^2 + 0.1663 * (P * EY)$ (Eq. 11) | Se $P_2O_5cal > 190$ então $P_2O_5rec = 190$ | |

P_2O_5cal : Quantidade de P_2O_5 calculada pelo modelo de recomendação (kg ha⁻¹); P: quantidade de P presente no solo (mg dm⁻³); P_2O_5rec : Quantidade de P_2O_5 recomendada respeitando os parâmetros de taxa mínima e máxima, considerados no modelo de recomendação (kg ha⁻¹); As equações utilizadas neste trabalho estão destacadas em cinza.

Tabela 10 Metodologia utilizada para cálculos das recomendações de potássio (K) nas culturas soja e milho

| Nutriente | Método | Cultura | Solo | Quantidade recomendada calculada (Kg ha ⁻¹) | Quantidade efetiva recomendada (Kg ha ⁻¹) |
|-----------|--------|---------|----------|---|--|
| K | D | Soja | Argiloso | $K_2O_{cal} = -229.92 * K + 109.06$ (Eq. 12) | Se $K_2O_{cal} < 40$, $K_2O_{rec} = 40$ Se $40 < K_2O_{cal} < 90$, $K_2O_{rec} = K_2O_{cal}$ Se $K_2O_{cal} > 90$ então $K_2O_{rec} = 90$ |
| | | | Arenoso | $K_2O_{cal} = -307.69 * K + 173.59$ (Eq. 13) | Se $K_2O_{cal} < 20$, $K_2O_{rec} = 20$ Se $20 < K_2O_{cal} < 100$, $K_2O_{rec} = K_2O_{cal}$ Se $K_2O_{cal} > 100$ então $K_2O_{rec} = 100$ |
| | | Milho | Argiloso | $K_2O_{cal} = -134.62 * K + 79.615$ (Eq. 14) | Se $K_2O_{cal} < 35$, $K_2O_{rec} = 35$ Se $35 < K_2O_{cal} < 65$, $K_2O_{rec} = K_2O_{cal}$ Se $K_2O_{cal} > 65$ então $K_2O_{rec} = 65$ |
| | | | Arenoso | $K_2O_{cal} = -115.38 * K + 77.051$ (Eq. 15) | Se $K_2O_{cal} < 40$, $K_2O_{rec} = 40$ Se $40 < K_2O_{cal} < 65$, $K_2O_{rec} = K_2O_{cal}$ Se $K_2O_{cal} > 65$ então $K_2O_{rec} = 65$ |
| | EP | Soja | | $K_2O_{cal} = -19.021 - 368.149 * K + 149.25 * K^2 + 52.781 * EY - 4.186 * EY^2 + 28.999 * K * EY$ (Eq. 16) | Se $K_2O_{cal} < 20$, $K_2O_{rec} = 20$ Se $20 < K_2O_{cal} < 120$, $K_2O_{rec} = K_2O_{cal}$ Se $K_2O_{cal} > 120$ então $K_2O_{rec} = 120$ |
| | | Milho | | $K_2O_{cal} = 88.077 - 363.011 * K + 344.666 * K^2 + 1.803 * EY + 0.362 * EY^2 + 4.048 * K * EY$ (Eq. 16) | Se $K_2O_{cal} < 20$, $K_2O_{rec} = 20$ Se $20 < K_2O_{cal} < 190$, $K_2O_{rec} = K_2O_{cal}$ Se $K_2O_{cal} > 190$ então $K_2O_{rec} = 190$ |

K_2O_{cal} : Quantidade de K_2O calculada pelo modelo de recomendação (kg ha⁻¹); K: quantidade de K presente no solo (cmolc dm⁻³); K_2O_{rec} : Quantidade de K_2O recomendada respeitando os parâmetros de taxa mínima e máxima considerados no modelo de recomendação (kg ha⁻¹).
As equações utilizadas neste trabalho foram destacadas em cinza.
Fonte: Beneduzzi (2020)

- **análise estatística:** após os cálculos de recomendação, foi realizada a avaliação dos dados por meio de análise estatística, pelo módulo análise exploratória. Desta forma, foram calculadas as medidas de posição (média, mediana), de dispersão (desvio-padrão, coeficiente de variação) e de forma da distribuição (coeficiente de assimetria e coeficiente de curtose), com o objetivo de verificar a existência de tendência central e dispersão dos dados. A hipótese de normalidade dos dados foi testada pelo teste de Anderson-Darling ao nível de 5% de significância. O coeficiente de variação (CV) foi considerado baixo, quando $CV \leq 10\%$ (homocedasticidade); médio, quando $10\% < CV \leq 20\%$; alto, quando $20\% < CV \leq 30\%$; e muito alto, quando $CV > 30\%$ (heterocedasticidade) (PIMENTEL-GOMES e GARCIA, 2009);
- **interpolação dos dados:** a precisão dos mapas temáticos depende da escolha do método de interpolação dos dados, pois eles influenciam na estimativa das variáveis em locais não amostrados. Assim, a interpolação dos dados de recomendação de NPK foi realizada pelo índice de seleção de interpolador (ISI), que determina automaticamente o melhor interpolador entre inverso da distância elevado a uma potência (IDP) ou krigagem ordinária (KO) em um conjunto de dados (BIER e SOUZA, 2017, SOBJAK, 2021). ISI também define os melhores parâmetros de cada interpolador, melhor expoente e número de vizinhos para o interpolador IDP e os melhores modelos de semivariograma, métodos de ajuste, lambda, número de defasagens, pares, corte, quantidade de intervalos de peitoril parciais e intervalos de alcance para a KO (BETZEK et al., 2019, SOBJAK, 2021). Por fim, o interpolador utilizado foi o que apresentou o menor valor para ISI. Para classificar a dependência espacial das variáveis, foi utilizado índice de dependência espacial, obtido pelo procedimento apresentado por Cambardella et al. (1994), que classifica a dependência espacial em forte ($IDE < 25\%$), moderada ($25\% < IDE < 75\%$) e fraca ($IDE > 75\%$). As grades de interpolação também foram definidas automaticamente com base no tamanho das áreas. Assim, para a área A foi definida e utilizada uma grade de 8x8 m, e para a área B, a grade foi de 6x6;
- **criação dos mapas temáticos:** a criação de mapas temáticos envolve um processo de classificação dos dados, no qual se define o número de classes, o método de classificação que irá estabelecer os intervalos das classes, com o objetivo de representar graficamente as diferenças entre os subconjuntos de dados. Assim, revelam-se padrões que são difíceis de serem percebidos quando os dados não são agrupados (AIKES et al., 2021; KRYGIER e WOOD, 2005). Desta forma, os dados foram divididos pelo método de intervalos iguais, pelo qual os dados são divididos em classes de mesma amplitude, ou seja, de mesmo

tamanho e gerados com duas, três e quatro classes. Foi utilizado o esquema de cores sequencial que associa cores claras para valores baixos e cores escuras para valores altos e é recomendado para dados numéricos ordenados em forma crescente, de baixo para alto (HARROWER e BREWER, 2003);

- **exportação dos mapas temáticos:** depois de gerados, os mapas foram exportados em formato de imagem (png) para um arquivo pessoal.

4.4 Zonas de manejo

Assim como para a criação dos mapas temáticos, Souza et al. (2018) também propuseram um protocolo específico para o delineamento de zonas de manejo, composto por sete etapas: (i) processamento de dados; (ii) normalização de dados; (iii) seleção de variáveis para o delineamento das zonas de manejo; (iv) interpolação de dados, (v) aplicação de um método de agrupamento dos dados, (vi) retificação das zonas de manejo e (vii) avaliação das zonas de manejo. A Figura 15 apresenta todas as etapas desenvolvidas no processo de delineamento, seguindo o protocolo desses autores.

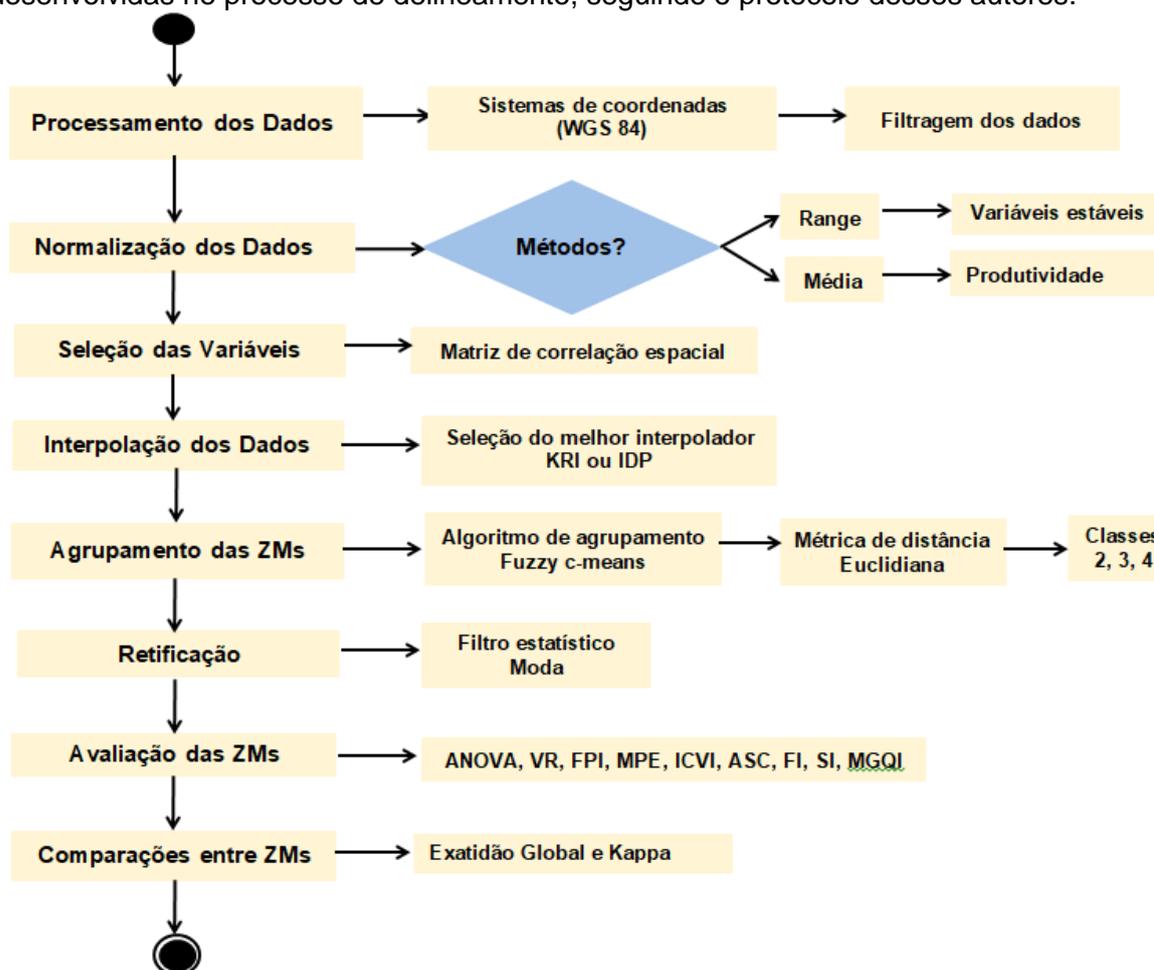


Figura 15 Etapas realizadas no processo de delineamento de zonas de manejo

- **processamento dos dados:** nesta etapa, os dados foram importados para a plataforma AgDataBox, filtrados e avaliados pela análise exploratória, conforme já descrito na criação dos mapas.
- **normalização dos dados:** a normalização das variáveis consideradas temporalmente estáveis ocorreu pelo método amplitude de Milligan e Cooper (1988). Já a produtividade, variável com variabilidade temporal devido a fatores como clima e do tipo de cultura, foi normalizada utilizando o método do desvio padrão (LARSCHEID e BLACKMORE, 1996). Em seguida foi calculada a produtividade normalizada média. Deste modo, a normalização compensa tanto as diferenças temporais quanto as diferenças entre culturas e safras. Além de não afetar seu padrão de distribuição espacial, ainda permite incluir diferentes culturas na mesma análise (ALCANTARA, 2015);
- **seleção das variáveis:** no delineamento de zonas de manejo, recomenda-se a utilização de variáveis estáveis, que possuam autocorrelação espacial e correlação espacial com a produtividade. Sendo assim, a análise de correlação espacial foi utilizada para avaliar a correlação entre os atributos (CZAPLEWSKI; REICH, 1993) e é possível verificar quais atributos influenciaram de forma significativa a produtividade. Após essa análise, foram criadas as matrizes de correlação espacial, utilizando 999 iterações com nível de 95% de significância. Por fim, utilizou-se a metodologia proposta por Bazzi et al. (2013) composta por cinco etapas, para selecionar as variáveis a serem utilizadas no delineamento das zonas de manejo: (i) foram eliminadas as variáveis que não apresentaram autocorrelação espacial significativa a 95% significância; (ii) foram removidas as variáveis que não apresentaram correlação espacial significativa com a produtividade; (iii) ordenou-se de modo decrescente as variáveis restantes, considerando o módulo do valor da correlação com a produtividade; (iv) foram eliminadas as variáveis redundantes (que se correlacionaram entre si), e dada preferência para a exclusão das que apresentaram menor correlação com a produtividade; (v) por fim, as variáveis restantes foram utilizadas para a geração das zonas de manejo;
- **interpolação dos dados:** foi realizada com a mesma metodologia utilizada na interpolação para criação dos mapas temáticos.
- **agrupamento das zonas de manejo:** as zonas de manejo foram delineadas com duas, três e quatro classes, utilizando o algoritmo de agrupamento Fuzzy C-Means associado à métrica de distância euclidiana (GAVIOLI et al., 2019; MUKHOPADHAYA et al., 2018);
- **retificação das zonas de manejo:** foi aplicado o filtro da mediana que elimina

pixels isolados e os substitui pelo valor mais frequente em sua vizinhança (ACHARYA et al., 2005; CÓRDOBA et al., 2016) com máscara de 5x5 conforme Betzek et al. (2018);

- **avaliação das zonas de manejo:** além da análise de variância (ANOVA) e do teste de comparação de médias de Tukey, foram aplicados outros critérios de avaliação tais como: índice de desempenho *fuzzy* (*Fuzziness Performance Index - FPI*), (FRIDGEN et al., 2004); índice da partição da entropia modificada (*Modified Partition Entropy – MPE*) (BOYDELL e MCBRATNEY, 2002); índice de redução da variância (*Variance Reduction - VR*); Índice de Validação de Cluster Melhorado (*Improved Cluster Validation Index – ICVI*) (GAVIOLI et al., 2016); coeficiente de silhueta médio (*Average Silhouette Coefficient - ASC*), índice de suavidade (*Smoothness index - SI*) (GAVIOLI et al. 2016); índice de fragmentação (IF%); e índice global de qualidade modificado (*Modified Global Quality Index – MGQI*) (SOBJAK, 2021).
- **comparações entre zonas de manejo:** após o processo de avaliação, os mapas de zonas de manejo, originais e retificadas, foram comparados entre si, utilizando os índices exatidão global (BACH et al., 2006) e Kappa (COHEN, 1960). Os valores do índice kappa foram classificados conforme Landis e Koch (1977): $0 < \text{Kappa} \leq 0,2$: sem concordância; $0,2 < \text{Kappa} \leq 0,4$: ruim; $0,4 < \text{Kappa} \leq 0,6$: moderado; $0,6 < \text{Kappa} \leq 0,8$: forte; $0,8 < \text{Kappa} \leq 1$: excelente.
- **recomendações de N-P-K por zonas de manejo:** as recomendações de N-P-K por zonas de manejo foram realizadas com os mesmos métodos e parâmetros que na recomendação por taxa variável. Contudo, foram utilizadas somente as médias dos teores de cada nutriente (N-P-K), referentes a cada unidade de zona de manejo. Portanto, pelo método EPMO, as recomendações de N foram calculadas para a aplicação de ureia no cultivo do milho, com base nas médias dos teores de matéria orgânica correspondente a cada unidade de zona de manejo. Pelos métodos EP e D, as dosagens de superfosfato simples e cloreto de potássio foram calculadas para serem aplicadas nas culturas de milho e soja, com base nas médias dos teores de P e K encontrados em cada zona de manejo.

4.5 Comparação do custo da adubação NPK em função do sistema de manejo

A comparação do custo dos fertilizantes, ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio foi realizada em função dos sistemas de manejo, agricultura convencional, taxa variável em toda área, e por zonas de manejo. O custo da adubação em cada sistema de

manejo foi calculado com base nos preços médios desses fertilizantes, em cada ano estudado (CONAB, 2022) (Tabela 11).

Tabela 11 Preços dos fertilizantes ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio

| Fertilizantes | Preço da tonelada (R\$) | | | | |
|----------------------|-------------------------|----------|----------|----------|-----------|
| | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 |
| Ureia | 1.245,75 | 1.273,30 | 1.453,15 | 1.390,60 | 1.287,00 |
| Superfosfato Simples | 908,10 | 838,95 | 1.045,65 | 1.074,40 | 1.033,000 |
| Cloreto de Potássio | 1.365,50 | 1.271,55 | 1.599,50 | 1.545,90 | 1.428,55 |

Fonte: CONAB (2022)

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Processamento dos dados e da análise estatística

Na análise descritiva (Tabela 12), observa-se o comportamento dos dados filtrados de MO, P e K disponíveis no solo nas duas áreas experimentais em seus respectivos anos agrícolas. Observa-se que, antes da limpeza de dados, a densidade da área A era de 73 pontos amostrais e a área B possuía 40 amostras de cada variável. Veja que o processo de filtragem identificou e removeu anomalias que influenciavam na qualidade dos dados como (pontos duplicados, negativos, nulos, *outliers* e *inliers*), em todos os conjuntos das três variáveis. Assim, não apresentaram normalidade nos dados, os atributos N (área A, 2014), P da área A em todos os anos amostrados, e K (área A, 2014 e área B, 2015). No entanto, observa-se que as médias e medianas desses atributos apresentam valores próximos, ou seja, isso indica que há uma tendência de distribuição simétrica nos dados. Os demais atributos apresentaram distribuição normal.

Ao analisar a variação dos dados em torno da média de N, P e K, segundo Pimentel Gomes e Garcia (2009), os autores verificam que somente os dados de N (área A, 2015) e (área B, 2016 e 2017) apresentaram homogeneidade nos dados, uma vez que o CV foi menor que 10%. Os demais CVs desse atributo apresentaram média variabilidade com valores entre ($10\% < CV \leq 20\%$). Com base nos valores de P, observa-se heterogeneidade nos dados nas duas áreas e em todos os anos estudados com ($CV > 30\%$) considerado muito alto. Já os valores dos CVs de Ks indicam variabilidade média (área A, 2013), variabilidade alta (área A, 2015 e área B, 2016 e 2017) com valores entre ($20\% < CV \leq 30\%$) e variabilidade muito alta (área A, 2014 e área B, 2015). Os teores de

P e K apresentam grande amplitude, o que explica a elevada variabilidade espacial desses nutrientes no solo. Vale ressaltar que sucessivas aplicações de fertilizantes na linha de semeadura podem contribuir para a manutenção ou o aumento da variabilidade espacial do solo desses nutrientes, tanto em macro quanto em microescala (RODRIGUES et al., 2012; SANTI et al., 2012; CHERUBIN et al., 2015)).

Tabela 12 Estatística descritiva dos dados filtrados de MO, P e K disponíveis no solo

| Nutrientes | Áreas | Anos | PO | PF | Mínimo | Média | Mediana | Máximo | DP | CV(%) | Box-Plot |
|------------|-------|-------|----|-----------|--------|-------------|---------|--------|-----|----------|----------|
| MO | A | 2013* | 73 | 65 | 26,8 | <u>39,5</u> | 40,2 | 50,9 | 6,0 | 15,3(m) | |
| | | 2014 | 73 | <u>61</u> | 25,4 | 32,4 | 30,8 | 45,5 | 4,7 | 14,5(m) | |
| | | 2015* | 73 | 66 | 29,1 | 36,5 | 36,1 | 45,7 | 3,2 | 8,8(b) | |
| | B | 2015* | 40 | 34 | 34,6 | <u>41,3</u> | 41,6 | 48,6 | 4,1 | 10,1(m) | |
| | | 2016* | 40 | 34 | 29,2 | 34,3 | 33,9 | 41,0 | 3,1 | 9,2(b) | |
| | | 2017* | 40 | <u>33</u> | 25,5 | 31,0 | 30,9 | 35,6 | 2,4 | 7,8(b) | |
| P | A | 2013 | 73 | 64 | 3,2 | <u>11,9</u> | 11,4 | 24,3 | 4,8 | 40,9(ma) | |
| | | 2014 | 73 | 68 | 2,6 | 9,3 | 8,8 | 21,6 | 4,0 | 43,7(ma) | |
| | | 2015 | 73 | 67 | 4,7 | 11,3 | 10,8 | 21,8 | 3,9 | 35,0(ma) | |
| | B | 2015* | 40 | 37 | 6,6 | 19,1 | 17,9 | 36,2 | 7,5 | 39,4(ma) | |
| | | 2016* | 40 | 37 | 11,2 | <u>21,4</u> | 20,9 | 36,5 | 6,6 | 31,0(ma) | |
| | | 2017* | 40 | 36 | 8,4 | 20,3 | 19,6 | 39,1 | 6,6 | 32,4(ma) | |
| K | A | 2013* | 73 | 67 | 0,3 | <u>0,6</u> | 0,6 | 0,9 | 0,1 | 19,7(m) | |
| | | 2014 | 73 | 65 | 0,1 | 0,3 | 0,3 | 0,5 | 0,1 | 31,6(ma) | |
| | | 2015* | 73 | 66 | 0,1 | 0,4 | 0,4 | 0,7 | 0,1 | 28,7(a) | |
| | B | 2015 | 40 | 38 | 0,3 | <u>0,6</u> | 0,6 | 1,1 | 0,2 | 35,8(ma) | |
| | | 2016* | 40 | 35 | 0,3 | 0,6 | 0,6 | 0,9 | 01 | 25,4(a) | |
| | | 2017* | 40 | 37 | 0,2 | 0,5 | 0,5 | 0,8 | 0,1 | 29,8(a) | |

Nota: PO: pontos originais; PF: pontos filtrados; DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação: baixo (b); médio (m); alto (a); muito alto (ma);* seguem uma distribuição normal com base no teste de normalidade de Anderson-Darling $P < 5\%$.

De acordo com a Figura 16, pode-se observar a variabilidade dos teores de MO, P e K disponíveis no solo nas duas áreas experimentais nos respectivos anos analisados.

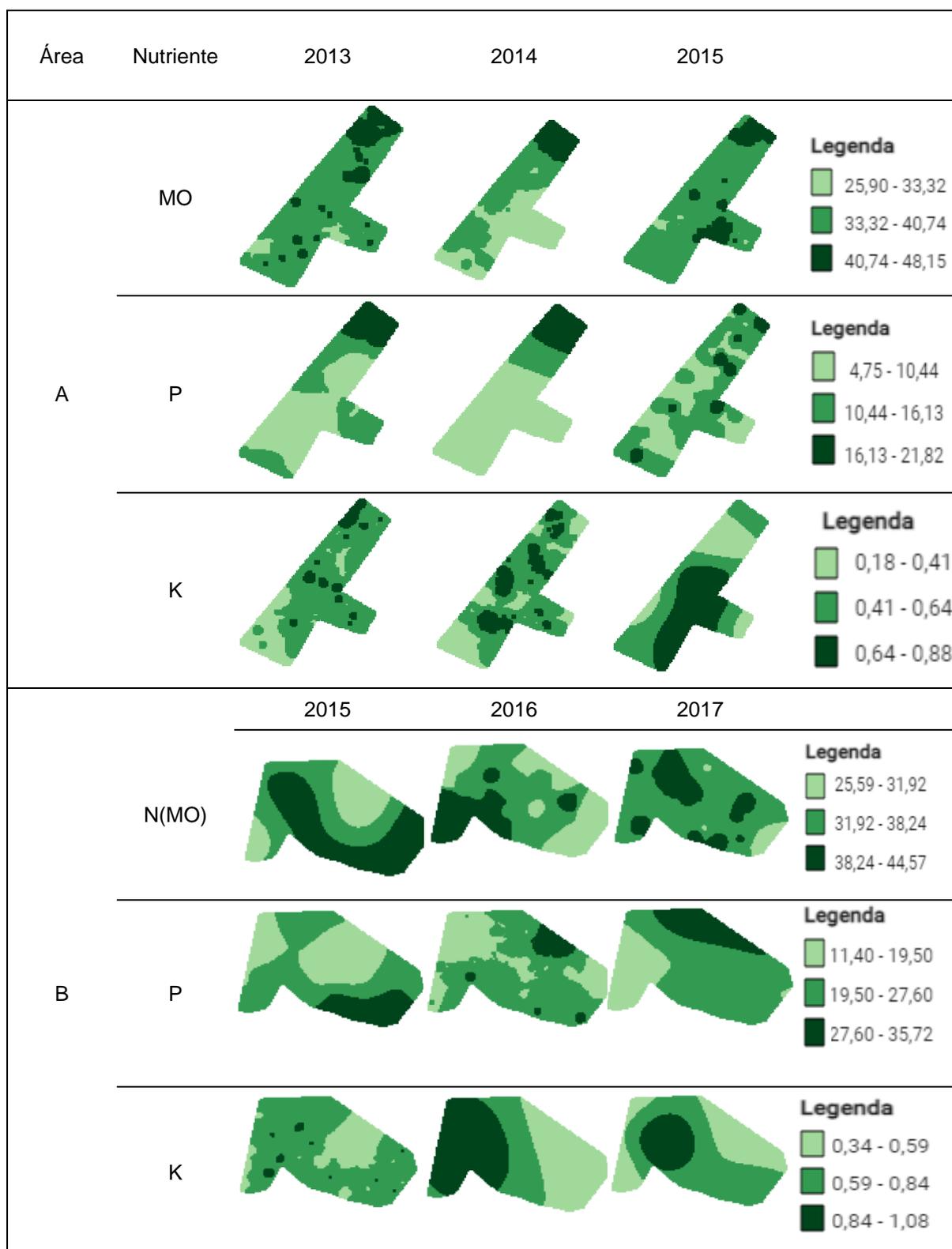


Figura 16 Mapas temáticos de MO, P e K disponíveis no solo nas áreas experimentais em seus respectivos anos

A Tabela 13 apresenta os níveis dos teores dos nutrientes MO, P e K encontrados no solo, que foram interpretados de acordo com Pauletti e Motta (2017). Verifica-se que os teores de MO em ambas as áreas variaram de médio a muito alto, com mais de 80% dos pontos classificados como alto ou muito alto. Tal resultado reflete a adoção do sistema de plantio direto consolidado nas áreas há mais de 20 anos. No entanto, por mais que o solo contenha muita MO, os adubos nitrogenados ainda são necessários para assegurar as culturas não leguminosas que requerem alta quantidade de N, já que cada 1% de MO libera somente entre 10 e 40 kg de N por ano, muito aquém das necessidades da cultura do milho, que exige em média 23,8 kg de N para cada tonelada de grãos produzidos (IPNI, 1998; DUETE et al., 2008).

A soja também exige grande quantidade deste nutriente. Estima-se que para cada tonelada de grãos produzidos, sejam necessários cerca de 80 kg de N, já que, 51 g kg⁻¹ são destinados para os grãos e 32 g kg⁻¹ permanecem nos restos culturais (HUNGRIA, 2007; KINUGASA et al., 2012; SATURNO et al., 2017). No entanto, no Brasil, a soja é cultivada sem o uso de fertilizantes nitrogenados, pois essa cultura tem a capacidade de obter nitrogênio pela fixação biológica que fornece 65% de nitrogênio à planta (HUNGRIA et al., 2007).

Os níveis de P encontrados no solo na área A (Tabela 12) variaram de baixo a muito alto. Em 2014, o fósforo registrou a maior porcentagem dos pontos classificados como baixo (31,5). No entanto, nota-se que ocorre uma melhora nos teores desse nutriente no ano seguinte, com pelo menos 70% dos pontos amostrais classificados como alto ou muito alto. A área B apresenta os melhores níveis de P, com 95% dos pontos amostrados em 2016 classificados como muito alto.

Segundo Veloso et al. (2020), o sistema plantio direto, com a rotação de culturas e a conservação da matéria orgânica, influenciou os estoques e padrões de ciclagem de P no solo de modo que as culturas aproveitaram melhor esse nutriente. Contudo, Coelho (2020) afirma que, apesar do P total estar presente em quantidades razoáveis no solo (5 mg dm³) e ainda que a cultura do milho extraia cerca de 10 kg desse nutriente para cada tonelada de grão produzida, bem menos quando comparado com o N e K (RESENDE, 2004), as respostas de sua aplicação em milho têm sido altas e frequentes. Isto ocorre em função da baixa eficiência (20% a 30%) de aproveitamento desse nutriente pela plantação, devido à alta capacidade de adsorção de P nos solos argilosos, o que reduz a disponibilidade do elemento às plantas (COELHO et al., 2020; VELOSO et al., 2020). Em contrapartida, a soja absorve um pouco mais desse elemento em comparação com o milho. Estima-se que, para cada 1000 kg de grãos de soja, sejam necessários em torno de 15 kg de P₂O₅ (EMBRAPA, 2013).

Em relação aos níveis de K Tabela (13), verifica-se que o solo das duas áreas

apresentou alta disponibilidade desse nutriente, com mais de 85% dos teores classificados como alto ou muito alto, o que indica presença de minerais primários e pouco intemperismo (SOBRAL, 2015). Tanto para o milho e quanto para a soja o potássio (K), após o nitrogênio, é o elemento mais absorvido por essas culturas, e são necessários 20 kg de K₂O para produzir 1.000 kg de grãos (MASCARENHAS et al., 2004). Assim, depois de analisar os níveis dos teores dos nutrientes MO, P e K disponíveis no solo, conclui-se que para ambas as áreas não houve deficiência significativa de nenhum destes nutrientes essenciais para o desenvolvimento das culturas.

Tabela 13 Interpretação dos teores de matéria orgânica, fósforo e potássio disponíveis no solo nas duas áreas experimentais em seus respectivos anos agrícolas

| Classificação dos nutrientes encontrados no solo | | | | | | | |
|--|------|------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| Níveis MO (g dm ⁻³) | Área | Ano | Muito baixo | Baixo | Médio | Alto | Muito Alto |
| | | | <7,0 | 7,1 – 14,0 | 15,0 – 24,0 | 25,0 – 34,0 | >34,0 |
| MO Encontrado% | A | 2013 | | | 5,4% | 20,5% | 73,9% |
| | | 2014 | | | 4,1% | 57,5% | 38,3% |
| | | 2015 | | | 1,3% | 17,8% | 80,8% |
| | B | 2015 | | | | 7,5% | 92,5% |
| | | 2016 | | | | 47,4% | 52,5% |
| | | 2017 | | | 2,5% | 82,5% | 15,0% |
| Níveis P (Mg dm ⁻³) | | | <3,0 | 0,3 – 7,0 | 7,0 – 9,0 | 9,0 – 12,0 | >12,0 |
| P Encontrado% | A | 2013 | | 13,7% | 13,7% | 30,1% | 42,4% |
| | | 2014 | | 31,5% | 27,3% | 12,3% | 28,7% |
| | | 2015 | | 12,3% | 15,0% | 30,1% | 42,4% |
| | B | 2015 | | | 2,5% | 15,0% | 80,0% |
| | | 2016 | | | | 5,0% | 95,0% |
| | | 2017 | | | 2,5% | 5,0% | 92,5% |
| Níveis K (cmolc dm ⁻³) | | | <0,06 | 0,06 – 0,12 | 0,12 – 0,21 | 0,21 – 0,45 | >0,45 |
| K Encontrado% | A | 2013 | | | | 15,0% | 84,9% |
| | | 2014 | | | 15,0% | 67,1% | 17,8% |
| | | 2015 | | | 1,3% | 54,7% | 43,8% |
| | B | 2015 | | | 2,5% | 30,0% | 67,5% |
| | | 2016 | | | | 17,5% | 82,5% |
| | | 2017 | | | 5,0% | 25,0% | 70,0% |

Fonte: Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná (PAULETTI e MOTTA, 2017).

5.2 Recomendação de NPK para o milho à taxa variável

As recomendações para a aplicação de ureia no milho (Tabela 14) foram realizadas pelo método EPMO com base no teor da MO disponível no solo e nos resíduos da leguminosa, considerando a expectativa de produtividade de (12 t ha⁻¹). Verifica-se pela análise estatística que somente o ano de 2014 (área A) não apresentou normalidade nos dados pelo teste de Anderson-Darling no nível de 5% de significância.

Pelo coeficiente de variação, observa-se alta variabilidade na (área A, 2013; área B, 2015), média (área A, 2014 e 2015; área B, 2016) e baixa (área B, 2017) por (PIMENTEL GOMES e GARCIA, 2009).

Nota-se que as médias recomendadas foram diferentes nos três anos estudados. Na área A, no ano 2014, houve maior necessidade de nitrogênio. As doses variaram entre 143 e 322 kg ha⁻¹, com média de 260 kg ha⁻¹. Na área B, 2017 foi o ano que mais necessitou de N, com doses que variaram entre 231 a 321 kg ha⁻¹, média 272 kg ha⁻¹. Nota-se ainda que, em ambas as áreas, os menores teores de MO disponíveis no solo (Tabela 12) correspondem aos mesmos anos que demandaram mais N para atingir o rendimento dos grãos em relação à expectativa desejada. Assim, confirma-se a relação direta entre a quantidade de N absorvida pelo milho com os teores de MO do solo (AMADO et al., 2002; FONTOURA e BAYER, 2009). Esses resultados corroboram com Beneduzzi (2020) que também encontrou valores semelhantes recomendados de N, gerados por esse método de recomendação com médias entre 226 e 199 kg ha⁻¹ em dois anos agrícolas em uma área experimental.

Estudos têm evidenciado que, ainda em solo fértil, as plantas de milho respondem à aplicação adequada de N. Há, portanto, a interferência em suas características relacionadas ao crescimento e ao seu desenvolvimento como: massa de mil grãos, altura das plantas, peso das espigas, comprimento da espiga, densidades populacionais, diâmetro do colmo, produção de matéria seca, teor de clorofila, produtividade e qualidade do grão pelo teor óleo e proteína (LACERDA et. al., 2015; ARAÚJO et. al., 2016; FOLONI et al., 2014; KAPPES et al., 2014; MENEGHINI et al., 2020, FERREIRA et al., 2001; SILVA, 2016).

No milho, a falta de nitrogênio provoca sintomas como clorose total, seguida de necrose, devido à menor produção de clorofila, além de afetar a relação carboidratos solúveis/proteína, que é maior, pois há falta de N para a síntese de proteína (SFREDO, 2008). Já as plantas com excesso deste nutriente apresentam maior abundância de aminoácidos livres, pois estas moléculas de baixo peso molecular predispõem a planta aos ataques de agentes patogênicos, por serem de fácil assimilação por tais organismos (YAMADA, 2004; PRADO, 2008). Melo et al. (2011) ainda afirmam que a aplicação de doses muito elevadas de N causam um consumo de luxo pela planta, pois a mesma aumenta a concentração de N na parte aérea e diminui o rendimento de grãos.

Desta forma, as recomendações de nutrientes devem ser baseadas em manuais de adubação que fornecem informações adequadas para a definição de doses variadas e estratégias de aplicação dos nutrientes para cada cultura abordada. Assim, eles contribuem para a otimização da renda líquida dos produtores rurais, além de minimizarem os impactos sobre o meio ambiente, pois a aplicação excessiva de

fertilizantes pode resultar em contaminação das águas subterrâneas (HOLLAND e SCHEPERS, 2010). Assim, Pauletti e Motta (2019) recomendam aplicar de 30 a 50 kg ha⁻¹ de N na semeadura e o restante na cobertura, quando as plantas estiverem entre os estádios vegetativos (V₂ a V₆) com as folhas totalmente expandidas e sem considerar a folha plumular. Em solo argiloso, os autores recomendam o parcelamento quando a dose de cobertura for superior a 120 kg ha⁻¹.

Tabela 14 Estatística descritiva da recomendação de ureia (kg ha⁻¹) pelo método expectativa de produtividade com base no teor de matéria orgânica no solo (EPMO)

| Áreas | Anos | Mínimo | Média | Mediana | Máximo | (DP) | CV(%) | Box-Plot |
|-------|-------|--------|-------|---------|--------|------|----------|----------|
| A | 2013* | 96,0 | 197,5 | 191,2 | 310,3 | 53,7 | 27,2(a) | |
| | 2014 | 143,6 | 260,1 | 274,5 | 322,2 | 41,9 | 16,1(m) | |
| | 2015* | 142,0 | 223,7 | 227,5 | 289,5 | 28,7 | 12,8 (m) | |
| B | 2015* | 116,4 | 181,2 | 178,3 | 240,3 | 36,8 | 20,3(a) | |
| | 2016* | 183,6 | 243,4 | 246,6 | 288,6 | 28,2 | 11,6(m) | |
| | 2017* | 231,4 | 272,4 | 273,4 | 321,1 | 21,7 | 7,9(b) | |

Nota: DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação: baixo (b); médio (m); alto (a); muito alto (ma); * seguem uma distribuição normal com base no teste de normalidade de Anderson-Darling P<5%.

As recomendações de aplicação de superfosfato simples (Tabela 15) foram realizadas pelo método EP para o cultivo de milho, considerando a expectativa de produtividade de 12 t ha⁻¹, teor de argila maior que 400 g kg⁻¹, presente no solo, e pelo método D, que considera o teor desse nutriente solo, como tipo granulométrico argiloso.

Ao serem analisados os resultados, verifica-se que somente os dados da área B (2017), método EP, apresentaram normalidade nos dados, pelo teste de Anderson-Darling no nível de 5% de significância. Apesar disso, a falta de normalidade nos dados não limita a interpolação por krigagem ordinária, de acordo com Chaves e Farias (2009), a normalidade dos dados não é impedimento para o uso das técnicas de geoestatística, pois, mais importante que isso é o efeito proporcional em que a média e a variância dos dados não sejam constantes, tendo em vista os semivariogramas apresentarem patamares bem definidos (CAVALCANTE et al., 2007; OLIVEIRA et al., 2015).

Devido à grande variabilidade dos teores de P disponível no solo, as doses desse fertilizante também variaram significativamente. A maior variação nos dados da área A foi obtida pelo método D, com variabilidade classificada como alta em todos os anos. Em contrapartida, na área B, obteve-se baixa variabilidade nos dados de recomendação com este método, sendo recomendada taxa mínima em 2016, pelos altos teores de P encontrados no solo.

Observa-se também que a recomendação por expectativa de produtividade de 12 t ha⁻¹ demanda mais P em relação ao método por disponibilidade de nutriente. Este

fato corrobora com o estudo de Veloso et al. (2020) que obtiveram máxima produtividade com a maior dose de P (180 kg ha^{-1}), mas foram necessários aproximadamente 20 Kg de P para produção de 1000 kg de grãos. Apesar de o milho exigir menos fósforo em comparação com o nitrogênio e o potássio, a deficiência deste nutriente nas plantas, principalmente quando jovens, provoca redução no crescimento e conseqüentemente compromete a produção (GRANT et al., 2001). Coelho e Alves (2004) afirmam que pelo fato do milho ser uma cultura de intenso desenvolvimento, de ciclo curto, ele requer maior nível de fósforo em solução e reposição mais rápida do P adsorvido, quando comparado às plantas de culturas perenes, e assim, altas doses desse nutriente devem ser fornecidas nas adubações para obter alta produtividade.

Estudos têm relatado respostas positivas e significativas à aplicação de P em várias características do milho, como: altura da planta, diâmetro do colmo, número de folhas por planta, número de espigas por planta, matéria seca da planta e produtividade de grãos (SALDANHA et al., 2017; TIRITAN et al., 2010; FERNANDES et al., 2020; VALDERRAMA et al., 2011). Essas características têm sido reportadas na literatura como variáveis que têm influência direta na produtividade de grãos em respostas à disponibilidade desse nutriente (MAGALHÃES et al., 1995; ALVIM et al., 2010). Fidelis et al. (2009) empregaram maior nível de fósforo e observaram que houve incremento na altura das plantas em relação ao ambiente com menor nível de fósforo. Já Bastos et al. (2010) observaram que o aumento da dose de fósforo no solo promoveu incremento na concentração do elemento na parte aérea, assim como Valderrama et al. (2011).

Tabela 15 Estatística descritiva da recomendação de P (superfosfato simples kg ha^{-1}) métodos EP e D

| Áreas | Métodos | Anos | Mínimo | Média | Mediana | Máximo | DP | CV(%) | Box-Plot |
|-------|---------|-------|--------|-------|---------|--------|-------|----------|----------|
| A | EP | 2013 | 156,4 | 512,2 | 535,4 | 699,7 | 126,1 | 24,6(a) | |
| | | 2014 | 248,3 | 576,0 | 593,9 | 710,6 | 96,0 | 16,6(m) | |
| | | 2015 | 241,4 | 529,5 | 549,2 | 674,2 | 100,1 | 18,9(m) | |
| | D | 2013 | 200,0 | 229,5 | 200,0 | 432,6 | 53,2 | 23,1(a) | |
| | | 2014 | 200,0 | 263,2 | 223,7 | 457,4 | 73,0 | 27,7(a) | |
| | | 2015 | 200,0 | 225,0 | 200,0 | 377,2 | 46,1 | 20,5(a) | |
| B | EP | 2015 | 100,0 | 339,1 | 363,2 | 639,3 | 173,2 | 51,0(ma) | |
| | | 2016 | 100,0 | 276,8 | 271,8 | 539,4 | 156,6 | 56,5(ma) | |
| | | 2017* | 100,0 | 305,5 | 309,7 | 601,2 | 150,5 | 49,2(ma) | |
| | D | 2015 | 200,0 | 203,6 | 200,0 | 307,0 | 18,1 | 8,8(b) | |
| | | 2016 | 200,0 | 200,0 | 200,0 | 200,0 | 0 | 0 | |
| | | 2017 | 200,0 | 201,0 | 200,0 | 236,6 | 6,1 | 3,0(b) | |

Nota: DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação: baixo (b); médio (m); alto (a); muito alto (ma); * seguem uma distribuição normal com base no teste de normalidade de Anderson-Darling $P < 5\%$.

As recomendações de cloreto de potássio para o cultivo de milho foram realizadas

pelo método EP, considerando as expectativas de produtividade de 12 t ha⁻¹ e pelo método D, que considera o teor de K disponível no solo com seu tipo granulométrico argiloso. Os resultados da análise descritiva (Tabela 16) indicam que nenhuma recomendação apresentou distribuição normal nos dados. Quanto à variação dos dados, observa-se que, de acordo com a descrição de Pimentel Gomes e Garcia (2009), somente a área B pelo método D apresentou baixo coeficiente de variação, os demais apresentam variação de coeficiente de variação entre médio e muito alto.

As maiores quantidades de K recomendadas são relativas ao método EP, já o método D recomendou a taxa mínima para a aplicação de cloreto potássio, devido à alta disponibilidade de K encontrado no solo das respectivas áreas (Tabela 11). Esse resultado corrobora com Sobjak (2021) e Beneduzzi (2020) que também encontraram elevados teores de K na área estudada, obtendo recomendação de taxa mínima com este mesmo método de recomendação de fertilizante.

Para adubação potássica, Pauletti e Motta (2017) recomendam que quando a dose recomendada de K₂O for superior a 60 kg ha⁻¹, deve-se então aplicar essa quantidade no sulco e o restante em cobertura, juntamente com a primeira adubação nitrogenada de cobertura.

Tabela 16 Estatística descritiva da recomendação cloreto de potássio (kg ha⁻¹) pelos métodos expectativa de produtividade e disponibilidade do nutriente no solo

| Áreas | Métodos | Anos | Mínimo | Média | Mediana | Máximo | DP | CV(%) | Box-Plot |
|-------|---------|------|--------|-------|---------|--------|------|----------|----------|
| A | EP | 2013 | 65,0 | 73,5 | 70,4 | 117,8 | 9,6 | 13,1(m) | |
| | | 2014 | 67,6 | 112,8 | 115,8 | 165,2 | 30,8 | 27,3(a) | |
| | | 2015 | 65,0 | 90,6 | 82,1 | 160,4 | 24,0 | 26,5(a) | |
| | D | 2013 | 58,4 | 58,4 | 58,4 | 58,7 | 0 | 0 | |
| | | 2014 | 58,4 | 68,7 | 65,5 | 92,4 | 12,2 | 17,8(m) | |
| | | 2015 | 58,4 | 61,5 | 58,4 | 90,2 | 6,6 | 10,8(m) | |
| B | EP | 2015 | 65,0 | 96,9 | 84,7 | 234,7 | 34,9 | 35,9(ma) | |
| | | 2016 | 65,2 | 79,2 | 71,6 | 121,4 | 15,8 | 19,9(m) | |
| | | 2017 | 65,0 | 81,5 | 75,2 | 134,4 | 19,1 | 23,4(a) | |
| | D | 2015 | 58,4 | 58,5 | 58,4 | 61,0 | 0,4 | 0,7(b) | |
| | | 2016 | 58,4 | 58,4 | 58,4 | 58,7 | 0,0 | 0,0(b) | |
| | | 2017 | 58,4 | 59,7 | 58,4 | 76,7 | 4,4 | 7,4(b) | |
| | | | 58,4 | 59,7 | 58,4 | 76,7 | 4,4 | 7,4(b) | |

Nota: DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação: baixo (b); médio (m); alto (a); muito alto (ma); * seguem uma distribuição normal com base no teste de normalidade de Anderson-Darling P<5%.

5.3 Recomendação de P e K para a soja à taxa variável

As recomendações de P (Tabela 17) foram realizadas pelo método EP para o cultivo de soja pelo fertilizante superfosfato simples, considerando a expectativa de produtividade de 4 t ha⁻¹ com teor de argila maior que 400 g kg⁻¹, presentes no solo e pelo método D. Portanto, considerou-se o teor desse nutriente disponível no solo e seu tipo granulométrico que é argiloso. Pela análise descritiva da recomendação desse atributo, verifica-se que não houve normalidade nos dados.

Em relação à variabilidade dos dados, observa-se que a área B apresenta coeficientes de variação classificados como muito alto pelo método EP, e baixo pelo método D, com recomendação de taxa mínima em 2016 e 2017, devido aos teores de P disponíveis no solo (Tabela 8). Sobjak (2021) e Beneduzzi (2020) também encontraram altos teores de P nas áreas estudadas, obtendo recomendação de taxa mínima com este mesmo método para as culturas de soja e milho.

Diversos estudos relatam efeito positivo do fósforo nas características da cultura da soja, como na altura da planta, número de nós da planta, massa e vigor da semente (VALADÃO JUNIOR et al., 2008; ROSA et al., 2015; MOTERLE et al., 2009; BATISTELLA FILHO et al., 2013; MARIN et al., 2015). Gonçalves Júnior et al. (2010) observaram que o dobro da dose de P recomendada, com base na interpretação da análise de solo, resultou em incremento de 29% no número de vagens produzidas e, conseqüentemente, 20% na produtividade na cultura da soja. Guareschi et al. (2011) testaram diferentes doses de P em cobertura e na linha de semeadura. Assim, os autores verificaram maior produtividade da cultura da soja quando o fertilizante foi aplicado no momento da semeadura, do que com aplicação a lanço em cobertura. Resultados semelhantes foram constatados por Batistella Filho et al. (2013). Assim, pode-se concluir que um bom suprimento de fósforo no momento adequado na cultura da soja promove incrementos significativos na produtividade (ARAÚJO et al., 2005).

Tabela 17 Estatística descritiva da recomendação de superfosfato simples (kg ha^{-1}) pelos métodos expectativa de produtividade e disponibilidade do nutriente no solo

| Áreas | Métodos | Anos | Mínimo | Média | Mediana | Máximo | DP | CV(%) | Box-Plot |
|-------|---------|------|--------|-------|---------|--------|-------|----------|----------|
| A | EP | 2013 | 100,0 | 374,7 | 386,4 | 592,0 | 118,6 | 31,6(ma) | |
| | | 2014 | 140,2 | 439,2 | 450,9 | 600,0 | 101,0 | 22,9(a) | |
| | | 2015 | 135,2 | 388,2 | 400,9 | 554,2 | 98,0 | 25,2(a) | |
| | D | 2013 | 275,0 | 285,3 | 275,0 | 448,7 | 29,3 | 10,2(m) | |
| | | 2014 | 275,0 | 302,9 | 275,0 | 475,0 | 49,4 | 16,3(m) | |
| | | 2015 | 275,0 | 282,5 | 275,0 | 385,7 | 22,5 | 7,9(b) | |
| B | EP | 2015 | 100,0 | 235,8 | 228,1 | 506,7 | 126,1 | 53,4(ma) | |
| | | 2016 | 100,0 | 189,8 | 157,3 | 390,5 | 102,6 | 54,0(ma) | |
| | | 2017 | 100,0 | 205,3 | 185,8 | 459,4 | 103,6 | 50,4(ma) | |
| | D | 2015 | 275,0 | 275,8 | 275,0 | 306,0 | 5,0 | 1,8(b) | |
| | | 2016 | 275,0 | 275,0 | 275,0 | 275,0 | 0 | 0 | |
| | | 2017 | 275,0 | 275,0 | 275,0 | 275,0 | 0 | 0 | |

Nota: DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação: baixo (b); médio (m); alto (a); muito alto (ma); * seguem uma distribuição normal com base no teste de normalidade de Anderson-Darling $P < 5\%$.

As recomendações de K para o cultivo de soja, pelo fertilizante cloreto de potássio, foram realizadas pelo método EP, considerando a expectativa de produtividade de 4 t ha^{-1} e pelo método D, que considera o teor desse nutriente disponível no solo com seu tipo granulométrico argiloso.

Ao serem analisados os resultados da análise descritiva apresentados na Tabela 18, observa-se que, em 2017, somente a recomendação da área B apresentou distribuição normal nos dados com variabilidade classificada como muito alta. E, pelo método D, a variação é classificada como baixa, de acordo com a descrição de Pimentel Gomes e Garcia (2009). Observa-se que as maiores recomendações para a aplicação de cloreto de potássio na soja, são relativas ao método de expectativa de produtividade. Pelo método de disponibilidade do nutriente K, há recomendação para a aplicação de dose mínima (área A, 2013 e área B, 2016) devido à alta disponibilidade desse nutriente encontrado no solo (Tabela 8). Sobjak (2021) e Beneduzzi (2020) também encontraram altos teores de K nas áreas estudadas, obtendo recomendação de taxa mínima com este mesmo método.

O fornecimento adequado desse nutriente na cultura da soja promove ganhos de rendimentos significativos bem como no número de vagens por planta, porcentagem de vagens com grãos e aumento da nodulação, maior qualidade na semente. Por conseguinte, eleva-se a concentração de óleo, diminui-se a incidência de doenças sobre a cultura e promove-se a tolerância aos fatores abióticos (TRIGOLO et al., 2015; MANTOVANI et al., 2017). A deficiência desse elemento pode prejudicar severamente a síntese proteica. O resultado é o acúmulo de concentração de aminoácidos livres no

tecido da planta de soja, que afeta o crescimento da planta, rendimento, o aumento da susceptibilidade às doenças e pragas (BALARDIN et al., 2006; DOMINGOS et al., 2015; MASCARENHAS et al., 2004).

Assim, a adubação potássica promove benefícios em diversas características da soja, como na altura das plantas na, massa seca aérea, no número de vagens, no teor de proteínas e óleo nos grãos, na redução da severidade e da taxa de progresso da ferrugem asiática, causada pelo fungo *Phakopsora pachyrhizi*, incremento da produtividade (ANTIGO et al., 2020; GUESSER et al., 2020; SEDIYAMA, 2016; MANTOVANI et al., 2017; LIMA et al., 2017; ZAMBIAZZI et al., 2017).

Segundo Pauletti e Motta (2017), a adubação potássica na soja pode levar à diminuição da germinação quando aplicada próxima da semente. Sendo assim, em doses superiores de 80 kg ha⁻¹ (K₂O), os autores recomendam aplicar o restante da dose a lanço desde a pré-semeadura até o estágio V₄, ou seja, plantas com quatro nós ou três trifólios abertos.

Tabela 18 Estatística descritiva da recomendação de cloreto de potássio (kg ha⁻¹) pelos métodos expectativa de produtividade e disponibilidade do nutriente no solo para a soja 4 (t ha⁻¹)

| Áreas | Métodos | Anos | Mínimo | Média | Mediana | Máximo | DP | CV(%) | Box-Plot |
|-------|---------|-------|--------|-------|---------|--------|------|----------|----------|
| A | EP | 2013 | 33,4 | 48,2 | 46,0 | 84,9 | 13,6 | 28,2(a) | |
| | | 2014 | 55,7 | 100,2 | 105,0 | 141,2 | 26,1 | 26,0(a) | |
| | | 2015 | 35,6 | 78,7 | 75,0 | 137,9 | 25,0 | 31,7(ma) | |
| | D | 2013 | 66,8 | 66,8 | 66,8 | 66,8 | 0 | 0 | |
| | | 2014 | 66,8 | 78,3 | 66,9 | 113,0 | 16,3 | 20,8(a) | |
| | | 2015 | 66,8 | 69,3 | 66,8 | 109,1 | 7,7 | 11,1(m) | |
| B | EP | 2015 | 33,4 | 53,9 | 44,8 | 99,7 | 21,9 | 40,6(ma) | |
| | | 2016 | 33,4 | 50,2 | 41,5 | 97,1 | 18,8 | 37,5(ma) | |
| | | 2017* | 33,4 | 57,5 | 51,3 | 119,2 | 25,0 | 43,5(ma) | |
| | D | 2015 | 66,8 | 66,8 | 66,8 | 66,8 | 0 | 0 | |
| | | 2016 | 66,8 | 66,8 | 66,8 | 66,8 | 0 | 0 | |
| | | 2017 | 66,8 | 68,0 | 66,8 | 86,1 | 4,3 | 6,4(b) | |

Nota: DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação: baixo (b); médio (m); alto (a); muito alto (ma); * seguem uma distribuição normal com base no teste de normalidade de Anderson-Darling P<5%.

5.4 Interpolação dos dados de recomendação de ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio

O IDP foi selecionado pelo método ISI como o melhor interpolador para a maior parte dos dados de recomendação de ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio para a aplicação na cultura do milho (Tabela 19). ISI também determinou

automaticamente os melhores expoentes e números ótimos de vizinhos para cada variável. Nota-se que o expoente 1 foi o mais utilizado na interpolação, seguido do expoente 1,5.

Tabela 19 Dados de recomendação de ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio para o milho, interpolados pelo IDP

| Milho | | | | | |
|------------|-------|------|---------|----------|----------|
| Nutrientes | Áreas | Anos | Métodos | Expoente | Vizinhos |
| N | A | 2013 | EPMO | 1 | 12 |
| | | 2014 | EPMO | 1 | 9 |
| | | 2015 | EPMO | 1 | 8 |
| | B | 2016 | EPMO | 4,5 | 11 |
| | | 2017 | EPMO | 2 | 9 |
| | | | | | |
| P | A | 2014 | EP | 1,5 | 6 |
| | | 2015 | EP | 3 | 9 |
| | | 2013 | D | 3,5 | 8 |
| | | 2014 | D | 3 | 11 |
| | | 2015 | D | 4,5 | 7 |
| | B | 2015 | EP | 4 | 4 |
| | | 2016 | EP | 1,5 | 6 |
| | | 2015 | D | 1,5 | 9 |
| | | 2016 | D | 1 | 12 |
| | | 2017 | D | 2 | 6 |
| K | A | 2013 | EP | 1 | 6 |
| | | 2014 | EP | 2 | 4 |
| | | 2013 | D | 1 | 8 |
| | | 2014 | D | 1,5 | 12 |
| | | 2015 | D | 3,5 | 11 |
| | B | 2015 | EP | 2,5 | 8 |
| | | 2016 | EP | 1,5 | 11 |
| | | 2016 | D | 1 | 10 |

Os dados de recomendação de superfosfato simples e cloreto de potássio para a aplicação na soja, apresentados na Tabela 19, também foram interpolados com o IDP. Assim como nos dados de recomendação para a cultura do milho (Tabela 20), o expoente 1 foi o mais utilizado na interpolação, seguido do expoente 2.

Tabela 20 Dados de recomendação de superfosfato simples e cloreto de potássio para a soja interpolada por IDP

| Soja | | | | | |
|------------|-------|------|---------|-----------|----------|
| Nutrientes | Áreas | Anos | Métodos | Expoentes | Vizinhos |
| P | A | 2014 | EP | 1 | 5 |
| | | 2015 | EP | 3 | 11 |
| | | 2013 | D | 1 | 6 |
| | B | 2015 | EP | 3,5 | 8 |
| | | 2016 | EP | 1 | 8 |
| | | 2015 | D | 2,5 | 10 |
| | | 2016 | D | 2 | 6 |
| | | 2017 | D | 1 | 4 |
| | | 2013 | EP | 2 | 10 |
| | | 2014 | EP | 1 | 4 |
| K | A | 2013 | D | 5 | 7 |
| | | 2014 | D | 1,5 | 9 |
| | | 2015 | D | 1 | 10 |
| | B | 2015 | D | 3,5 | 6 |
| | | 2016 | D | 2 | 5 |

Na Tabela 21, encontram-se os dados de recomendação de ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio para a cultura do milho, e superfosfato simples e cloreto de potássio para a soja, interpolados pela krigagem ordinária, com base no valor de ISI. Este índice verificou e determinou automaticamente os melhores parâmetros dos semivariogramas ajustados para cada dado.

Com base nos resultados, verifica-se que todos os dados apresentam dependência espacial com patamares bem definidos. Houve forte dependência espacial para P (área A, 2013) e a dependência espacial foi moderada para os demais. O modelo gaussiano se ajustou melhor aos dados da área B e o exponencial aos dados da área A. O maior alcance foi encontrado nos dados de K (área A, 2015) com 464,7 e o menor valor em P (área B, 2017) com 153,7 metros. Segundo Molin (2015), quanto maior for a dependência espacial, maior será a precisão na interpolação por meio da Krigagem. Visto que a dependência espacial é a razão entre o efeito pepita e o patamar. Assim, quanto maior for a diferença entre esses dois parâmetros, maior será a continuidade do fenômeno, que reflete no valor do alcance, ou seja, quanto maior o alcance menor será a variabilidade do atributo a curtas distâncias e maior confiança na estimativa dos dados (MOLIN et al., 2015).

Tabela 21 Dados de recomendação de ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio, interpolados pela Krigagem, com seus modelos e parâmetros estimados

| Milho | | | | | | | | | |
|------------|-------|------|---------|-------------|--------|---------|-------|-----------|-------|
| Nutrientes | Áreas | Anos | Métodos | Modelos | EP | Pat. | A(m) | ID (%) | ISI |
| N | B | 2015 | EPMO | Gaussiano | 835,8 | 1712,6 | 161,8 | 48,80(Mo) | 0,085 |
| P | A | 2013 | EP | Exponencial | 4129,5 | 17387,1 | 285,9 | 23,75(Fo) | 0,062 |
| | B | 2017 | EP | Gaussiano | 8446,4 | 23902,4 | 153,7 | 35,34(Mo) | 0,160 |
| K | A | 2015 | EP | Exponencial | 459,8 | 740,6 | 464,7 | 62,08(Mo) | 0,051 |
| | | 2017 | EP | Gaussiano | 239,3 | 537,9 | 265,1 | 44,49(Mo) | 0,099 |
| | B | 2015 | D | Gaussiano | 0,208 | 0,353 | 304,8 | 58,92(Mo) | 0,050 |
| | | 2017 | D | Gaussiano | 9,8 | 35,4 | 298,6 | 27,68(Mo) | 0,234 |
| Soja | | | | | | | | | |
| Nutriente | Área | Ano | Método | Modelo | EP | Pat. | A(m) | ID (%) | ISI |
| P | A | 2013 | EP | Exponencial | 3357,1 | 14360,1 | 184,5 | 23,38(Fo) | 0,025 |
| | | 2014 | D | Exponencial | 1635,8 | 3173,0 | 328,0 | 51,55(Mo) | 0,025 |
| | | 2015 | D | Gaussiano | 464,7 | 594,9 | 190,3 | 38,11(Mo) | 0,031 |
| | B | 2017 | EP | Gaussiano | 4800,7 | 13278,8 | 230,6 | 36,15(Mo) | 0,045 |
| K | A | 2015 | EP | Esférico | 411,8 | 692,9 | 329,3 | 59,43(Mo) | 0,009 |
| | | 2015 | EP | Gaussiano | 419,3 | 724,1 | 290,6 | 57,91(Mo) | 0,037 |
| | B | 2016 | EP | Exponencial | 246,2 | 455,2 | 298,0 | 54,09(Mo) | 0,095 |
| | | 2017 | EP | Gaussiano | 321,1 | 814,6 | 180,6 | 39,42(Mo) | 0,121 |
| | | 2017 | D | Gaussiano | 9,1 | 34,1 | 298,6 | 26,69(Mo) | 0,246 |

5.5 Mapas temáticos

Após a interpolação dos dados, foram gerados os mapas temáticos referentes à recomendação de NPK para as duas áreas experimentais, com duas, três e quatro classes, divididas por intervalos iguais, utilizando o esquema de cores sequencial que associa cores claras para valores baixos e cores escuras para valores altos. A seguir, as Figuras (17, 18, 19, 20 e 21) ilustram os mapas temáticos das recomendações de ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio para aplicação no milho, pelos métodos EPMO, EP e D. As Figuras (22, 23, 24 e 25) ilustram os mapas temáticos das recomendações de superfosfato simples e cloreto de potássio para aplicação na soja, pelos métodos, EP e D.

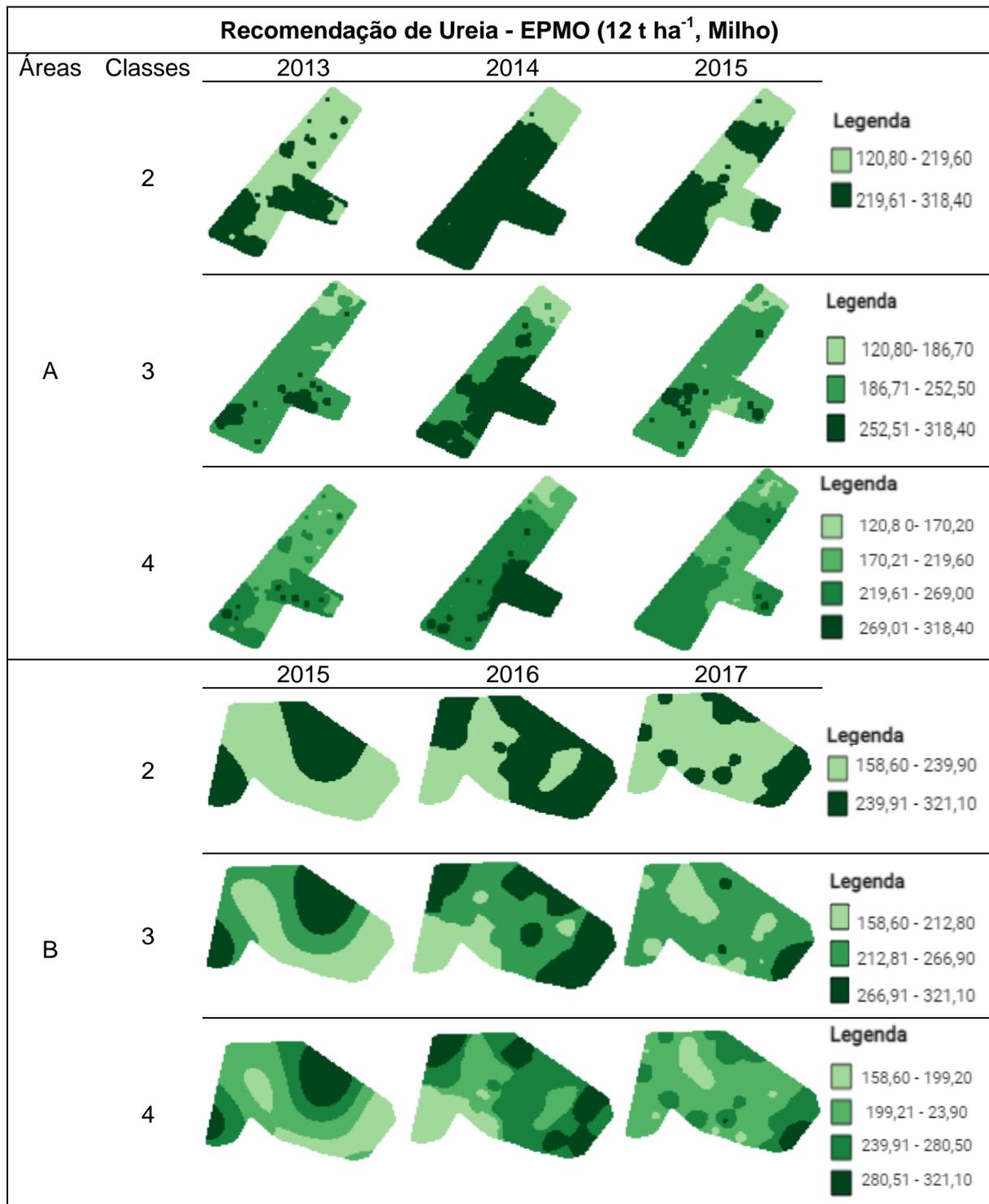


Figura 17 Mapas temáticos de recomendação de ureia pelo método EPMO 12 t ha^{-1} para o milho

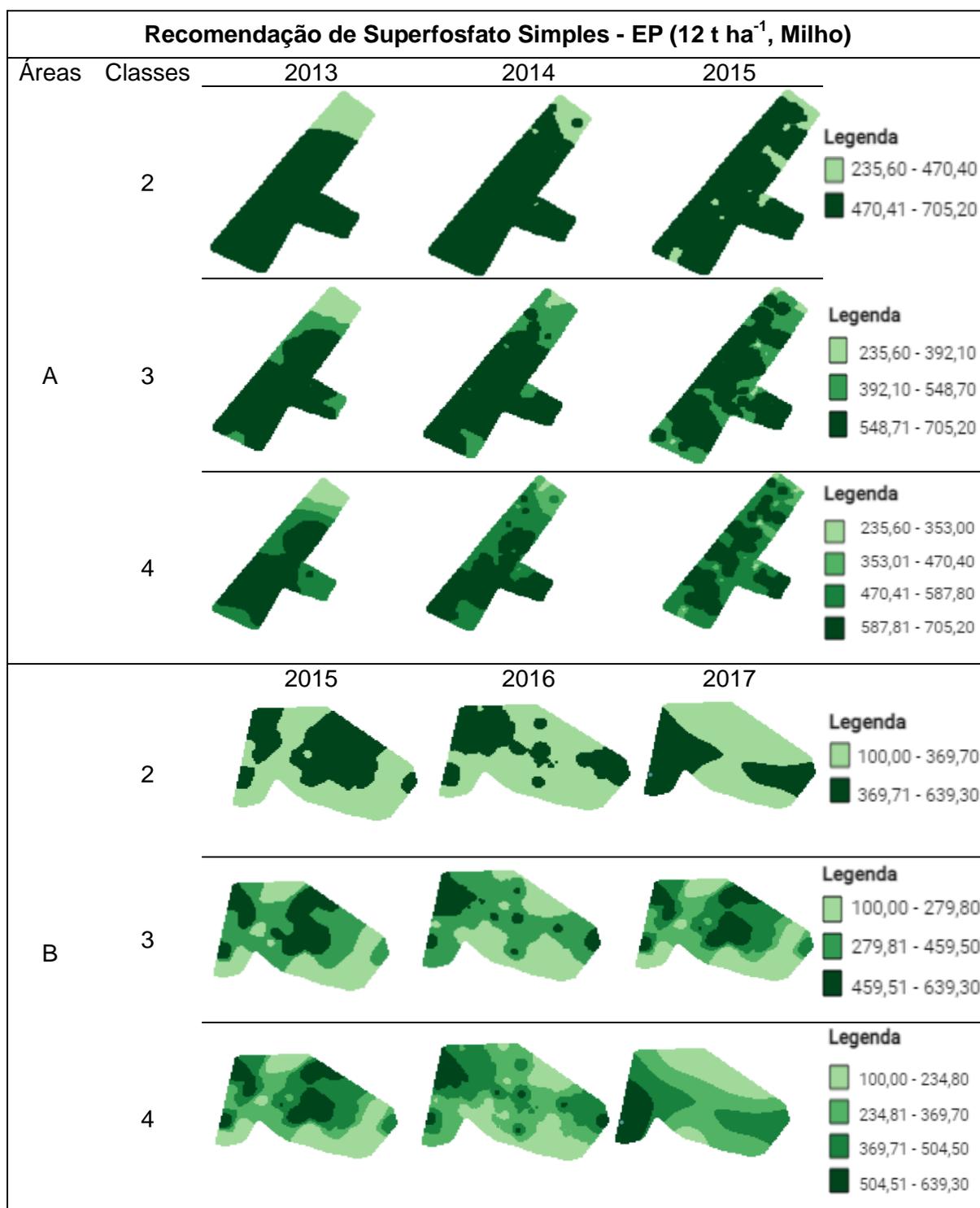


Figura 18 Mapas temáticos de recomendação superfosfato simples pelo método EP de 12 t ha⁻¹ para o milho

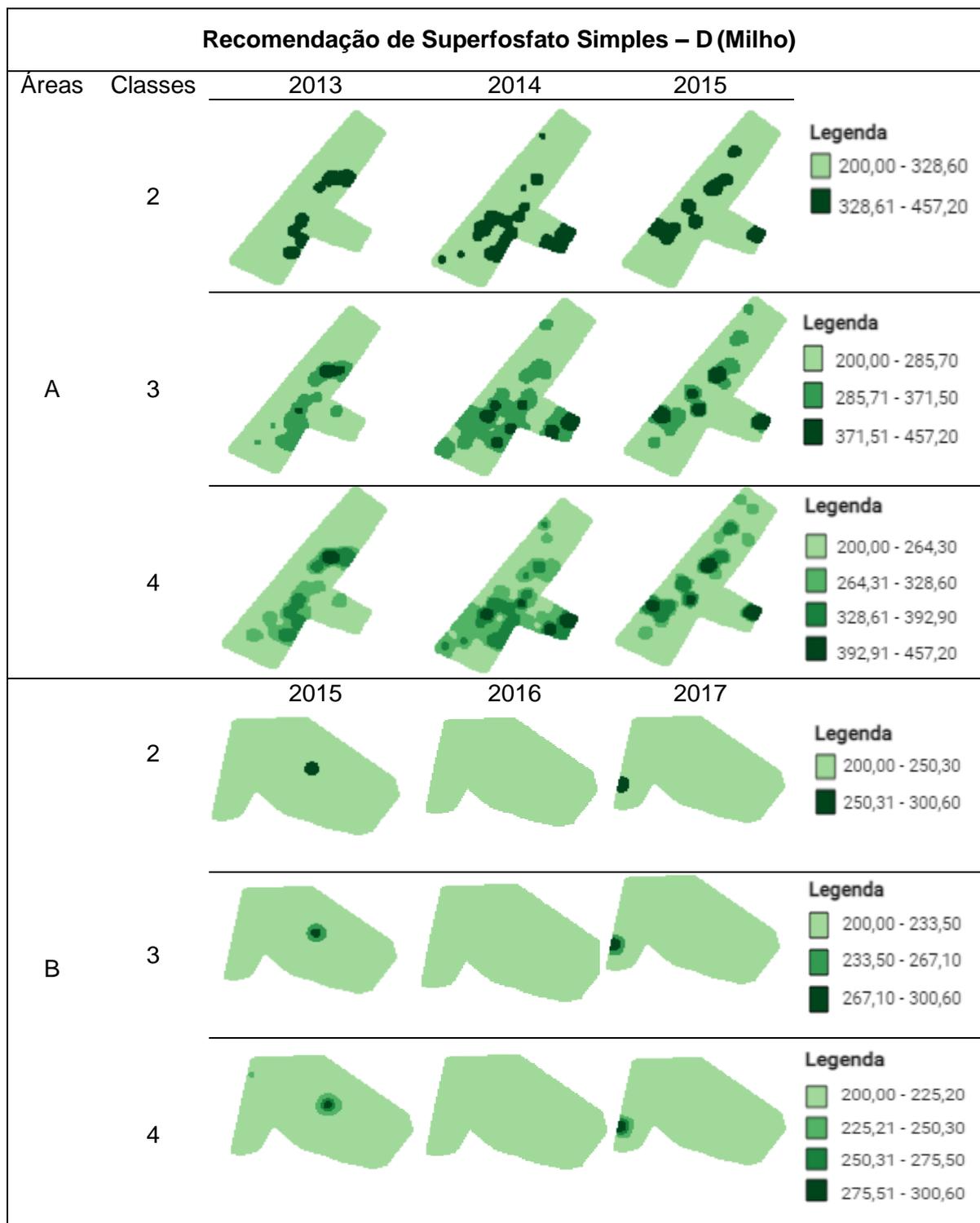


Figura 19 Mapas temáticos de recomendação superfosfato simples pelo método D para o milho

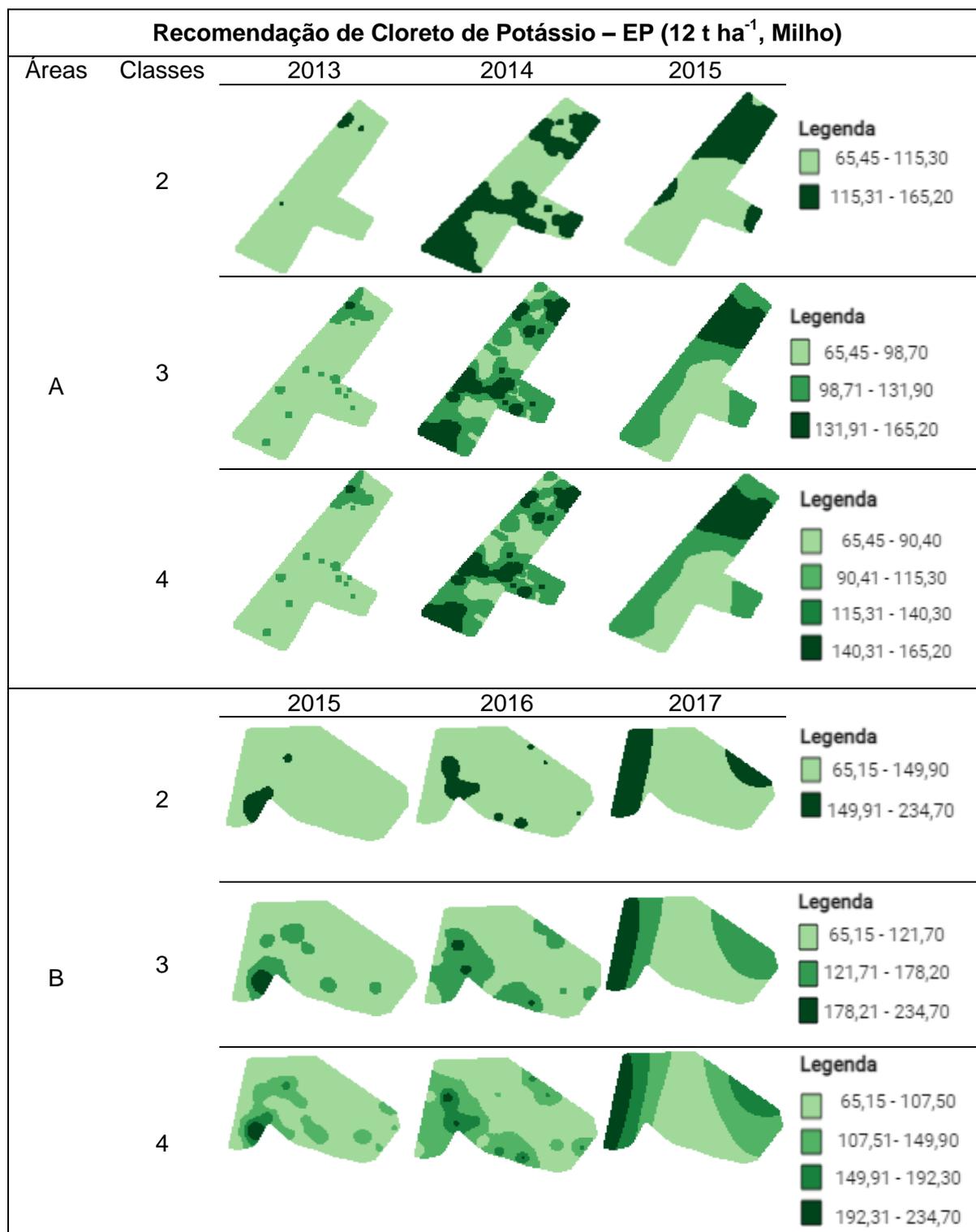


Figura 20 Mapas temáticos de recomendação cloreto de potássio pelo método EP de 12 t ha⁻¹ para o milho

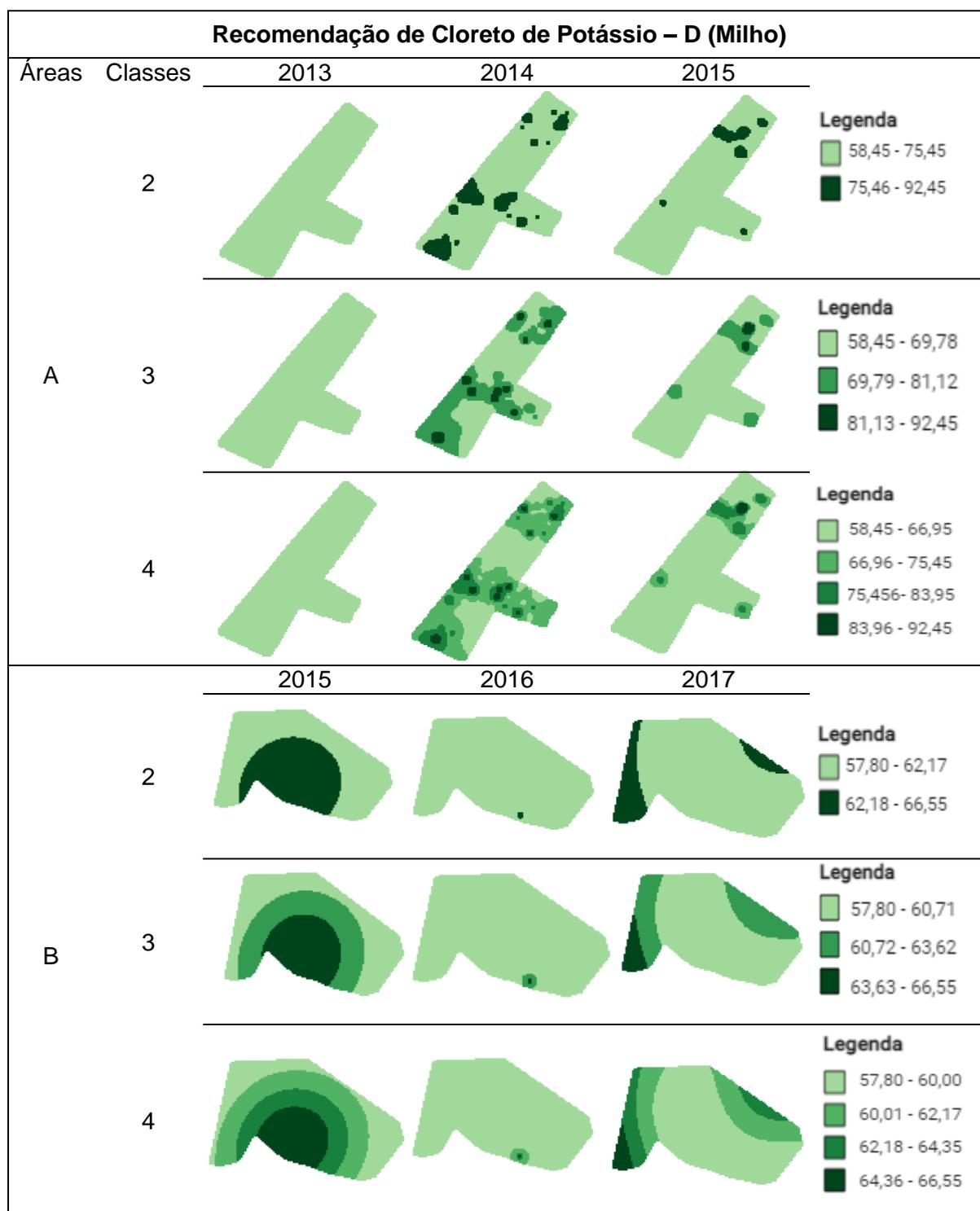


Figura 21 Mapas temáticos de recomendação cloreto de potássio pelo método D para o milho

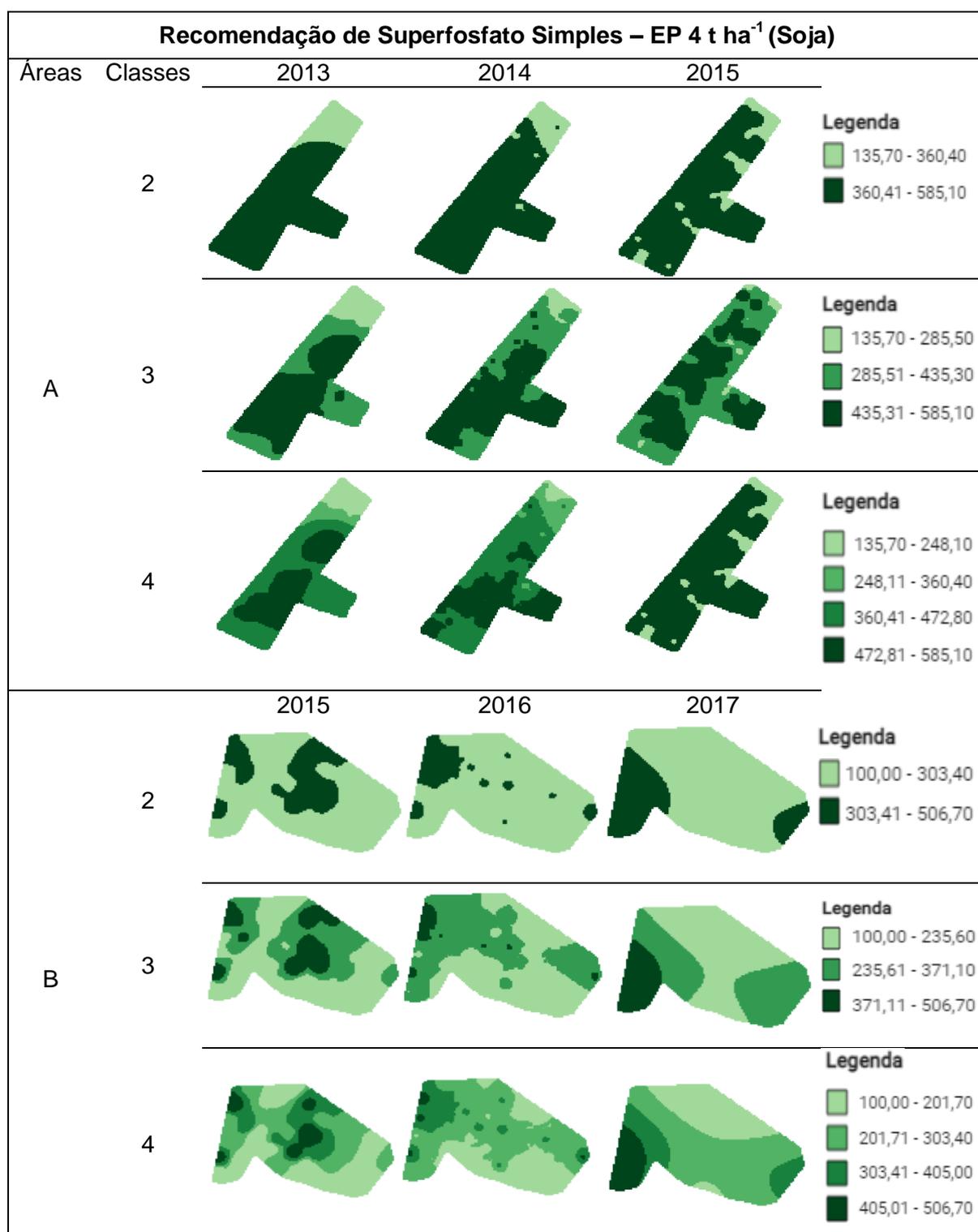


Figura 22 Mapas temáticos de recomendação superfosfato simples pelo método EP de 4 t ha⁻¹ para a soja

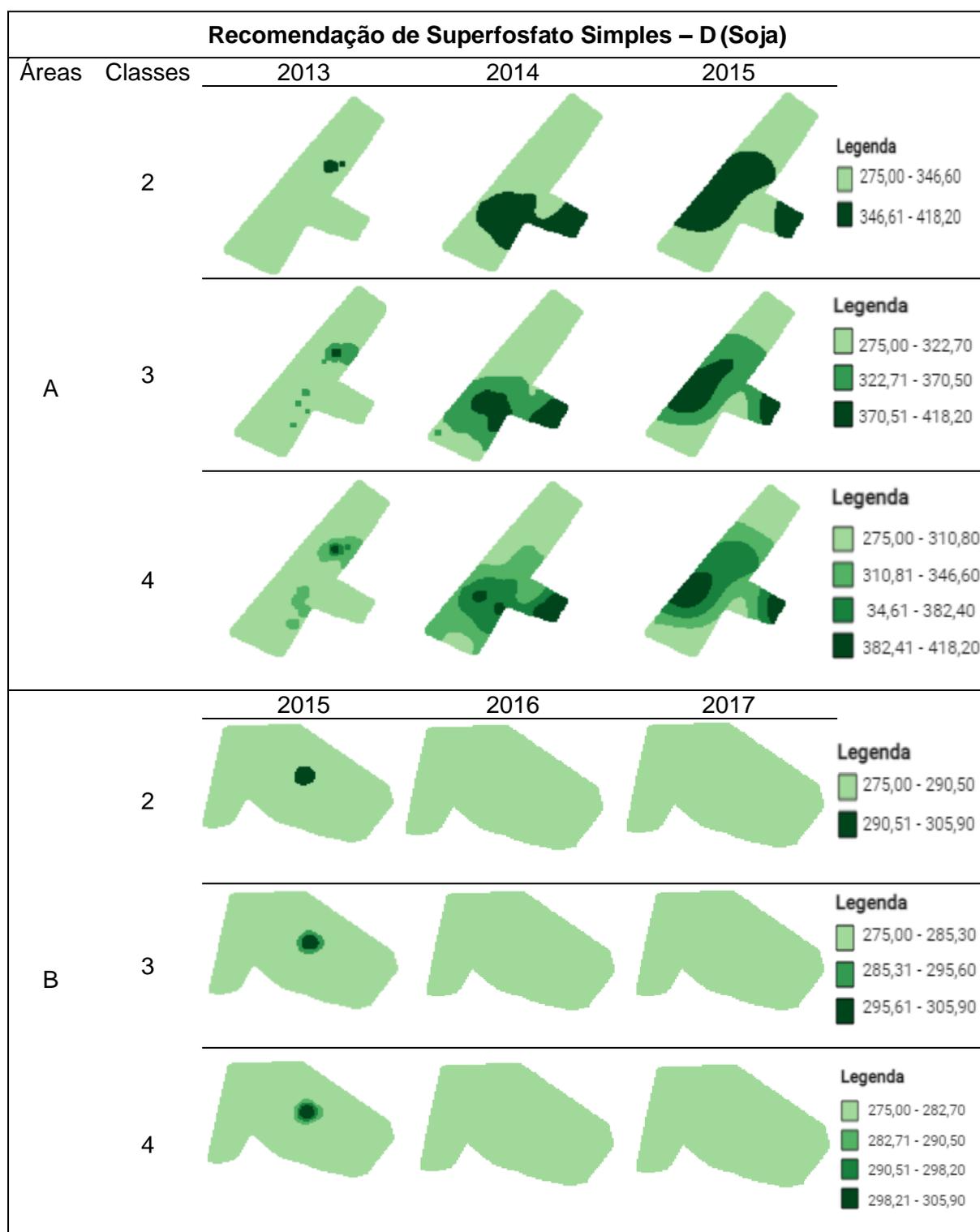


Figura 23 Mapas temáticos de recomendação superfosfato simples pelo método D para a soja

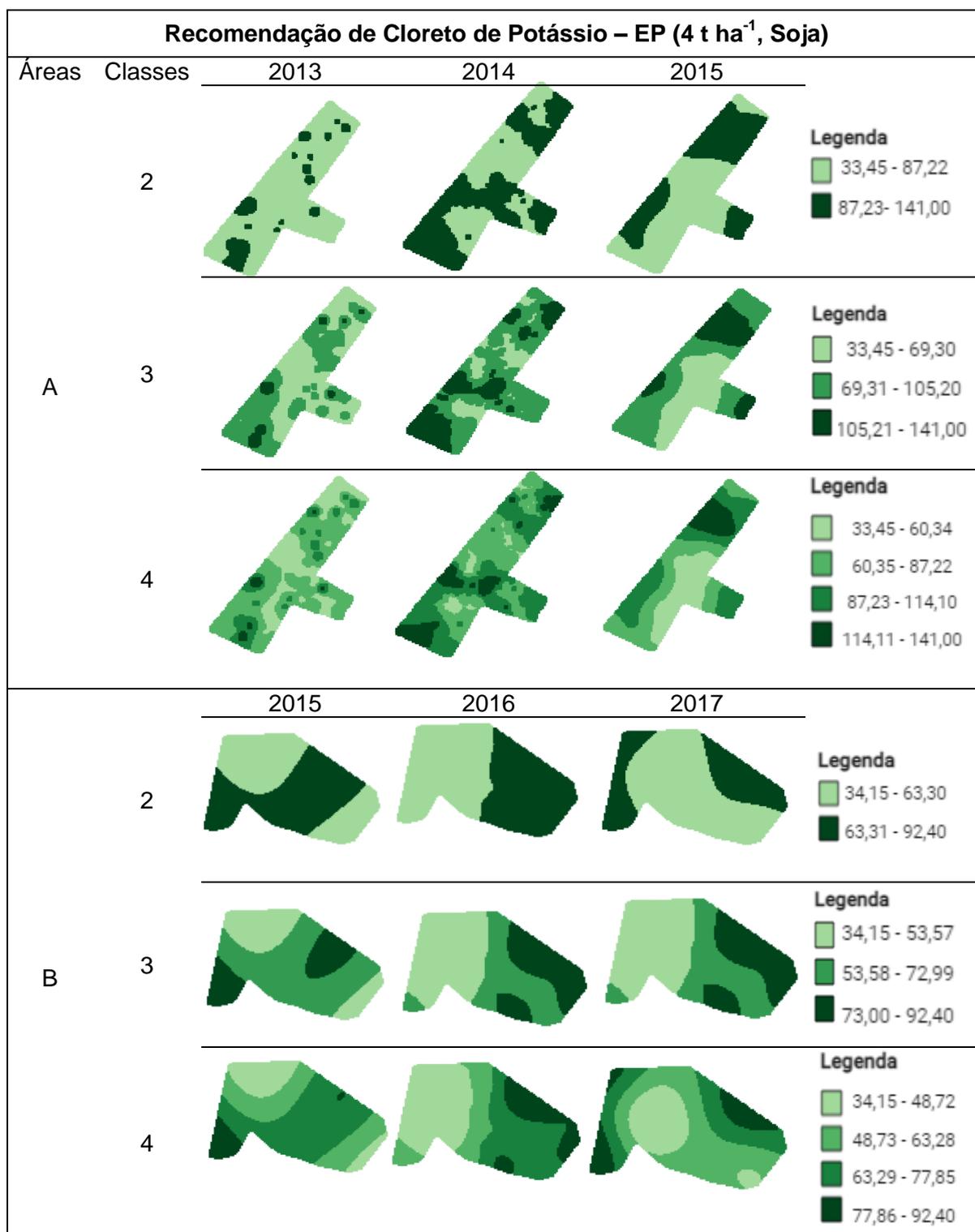


Figura 24 Mapas temáticos de recomendação cloreto de potássio pelo método EP de 4 t ha⁻¹ para a soja

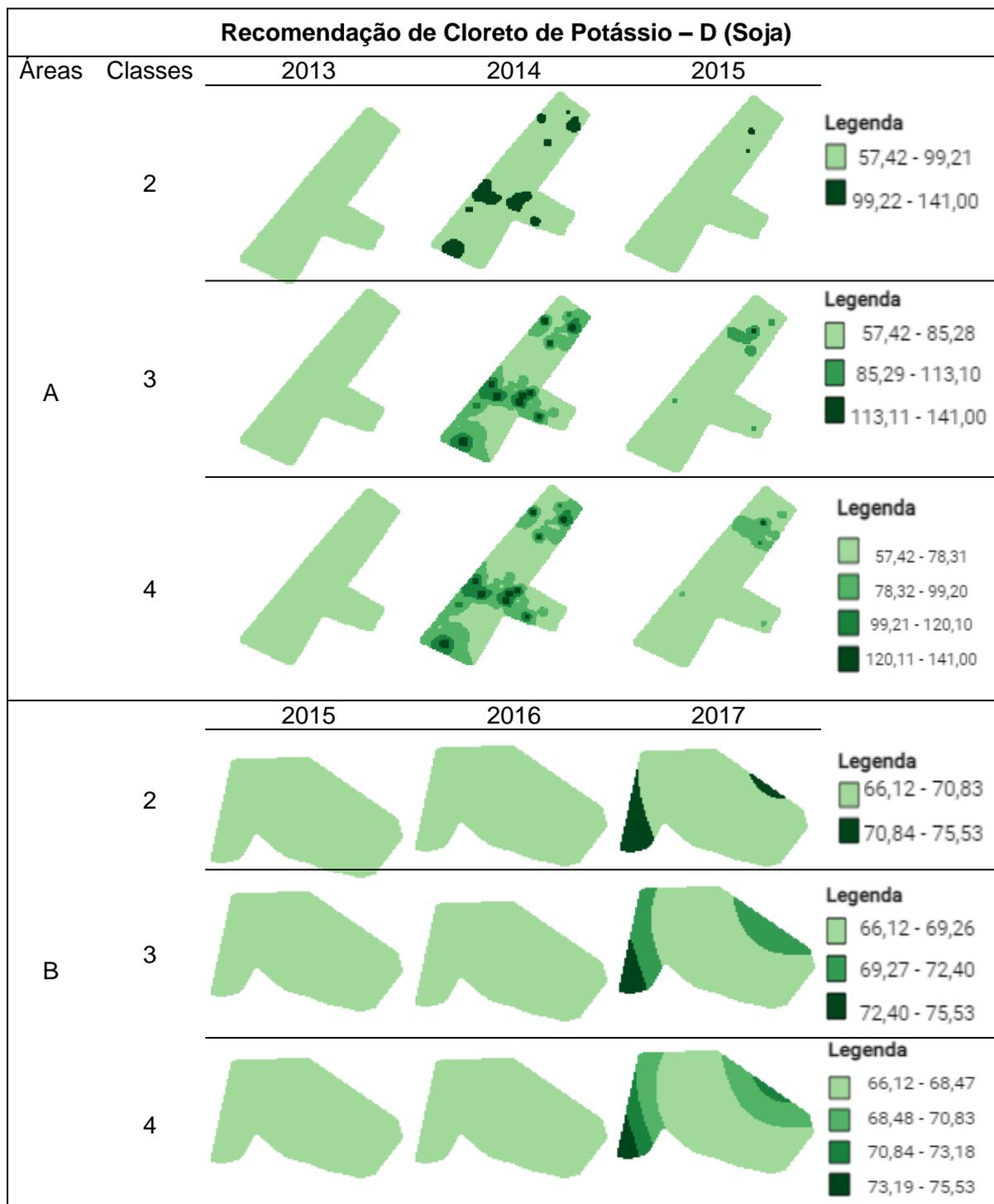


Figura 25 Mapas temáticos de recomendação cloreto de potássio pelo método P para a soja

5.4 Delineamento das zonas de manejo

As variáveis estáveis candidatas ao delineamento das zonas de manejo (ZMs) apresentadas na Tabela (22) passaram pelo processo de filtragem dos dados e

normalização pelo método da amplitude. Posteriormente, pelo método da matriz de correlação espacial, tais variáveis foram correlacionadas com os dados de produtividade de milho da área A (2013, 2014 e 2015) e soja da área B (2015 e 2017) que foram normalizados pelo método desvio padrão e pela média.

Em seguida, as variáveis foram selecionadas pela metodologia de Bazzi et al. (2013) que, na primeira análise: as variáveis que não apresentaram autocorrelação espacial significativa a 95% significância foram eliminadas: área A, MO (2013), pH (2013), declividade, RSP 0,1-0,2 (2013) e RSP 0,2-0,3 (2013 e 2015) e área B: MO (2017), pH (2015, 2016 e 2017), areia, argila e silte (2016), RSP 0,0-0,1, RSP 0,1-0,2 e RSP 0,2-0,3 (2016). Na segunda, as variáveis que não apresentaram correlação espacial com a produtividade foram eliminadas: área A, pH (2014 e 2015), argila, silte (2012), RSP 0,0-0,1 (2013) e RSP 0,1-0,2 (2015) e área B, MO (2016). Na terceira, as variáveis redundantes foram eliminadas: área A, MO (2014) e MO (2015) na área B. Por fim, as variáveis restantes foram selecionadas para delinear as Zms: área A, MO (2015), altitude, areia (2012) e RSP 0,0-0,1 (2015) e área B, somente altitude.

Essas variáveis também foram utilizadas no delineamento das ZMs em outros estudos, como Bazzi et al. (2013) que utilizaram a variável areia em conjunto com o Magnésio. Já Gavioli et al. (2016) encontraram melhor correlação espacial das variáveis altitude e RSP 0,0-0,1 com a produtividade da soja, assim como Schenatto et al. (2017). Segundo Kitchen et al. (2005) e Valente (2010), a utilização de diferentes variáveis em conjunto apresenta resultados mais satisfatórios na classificação do solo para recomendação de corretivos e fertilizantes.

Tabela 22 Atributos utilizados e período de coleta em cada área experimental

| Atributos | Área A | | | | Área B | | | |
|-----------------------|--------|------|------|------|--------|------|------|------|
| | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2012 | 2015 | 2016 | 2017 |
| MO | | X | X | X | | X | X | X |
| pH | | X | X | X | | X | X | X |
| Altitude (m) | X | | | | X | X | | |
| Declividade (°) | X | | | | X | X | | |
| Areia (%) | X | | | | | | X | |
| Argila (%) | X | | | | | | X | |
| Silte (%) | X | | | | | | X | |
| RSP 0,0 – 0,1 m (MPa) | | X | | X | | X | | |
| RSP 0,1 – 0,2 m (MPa) | | X | | X | | X | | |
| RSP 0,2 – 0,3 m (MPa) | | X | | X | | X | | |

Nota: X Eliminados por não apresentarem autocorrelação espacial; X eliminados por não apresentarem correlação espacial com a produtividade; X eliminados por serem redundantes; X selecionadas para geração das zonas de manejo

Os dados da MO, altitude, areia e RSP 0,0-0,1 (área A, 2015) e altitude (área B) foram interpolados pela Krigagem Ordinária, identificada como o melhor interpolador pelo índice ISI para todos os atributos. Assim a geoestatística foi utilizada para analisar a variabilidade espacial, bem como a escolha do modelo de semivariograma, conforme Isaaks e Srivastava (1989). Após a análise, verificou-se que o modelo gaussiano se ajustou melhor para todos os atributos estudados e que a dependência espacial dos atributos MO, areia, RSP 0,0 – 0,1 é moderada. A altitude demonstrou dependência espacial classificada como forte nas duas áreas em estudo, segundo Cambardella et al. (1994) (Tabela 23).

Tabela 23 Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas

| Atributos | Áreas | Anos | Modelos | EP | Pat. | A(m) | IDE (%) |
|---------------|-------|------|-----------|-------|-------|-------|------------|
| MO | A | 2015 | Gaussiano | 0,018 | 0,029 | 377,6 | 62,07 (Mo) |
| Altitude | A | 2012 | Gaussiano | 0,002 | 0,105 | 464,7 | 1,90 (Fo) |
| Areia | A | 2012 | Gaussiano | 0,024 | 0,078 | 464,7 | 30,77 (Mo) |
| RSP 0,0 – 0,1 | A | 2015 | Gaussiano | 0,046 | 0,061 | 377,6 | 74,65 (Mo) |
| Altitude | B | 2015 | Gaussiano | 0,0 | 54,75 | 247,7 | 3,45 (Fo) |

Após a interpolação dos dados, foram gerados os mapas temáticos das zonas de manejo com duas, três e quatro classes, pelo algoritmo Fuzzy C-Means associado à métrica de distância euclidiana (Figura 1). Em seguida, as zonas de manejo foram retificadas pelo filtro mediana e chamadas de zonas de manejo retificada (ZMr). A retificação elimina manchas ou pixels isolados nos dados (BETZEK et al., 2018). No entanto, esse processo não identificou nenhuma fragmentação nos mapas. Assim, o mapa ficou retificado igual ao mapa original, o que demonstra a eficiência do algoritmo Fuzzy C-Means no agrupamento dos dados, eficiência relatada também em outros trabalhos (SCHENATTO et al., 2016; SOBJAK et al., 2018; CAMICIA et al., 2018; GAVIOLI et al., 2019). Pela Figura 20, é possível observar que, conforme o número de classes aumenta, as zonas de manejo vão se tornando mais irregulares e apresentam pequenas áreas, que são difíceis de serem manejadas, seja por limitações técnicas seja por limitações econômicas.

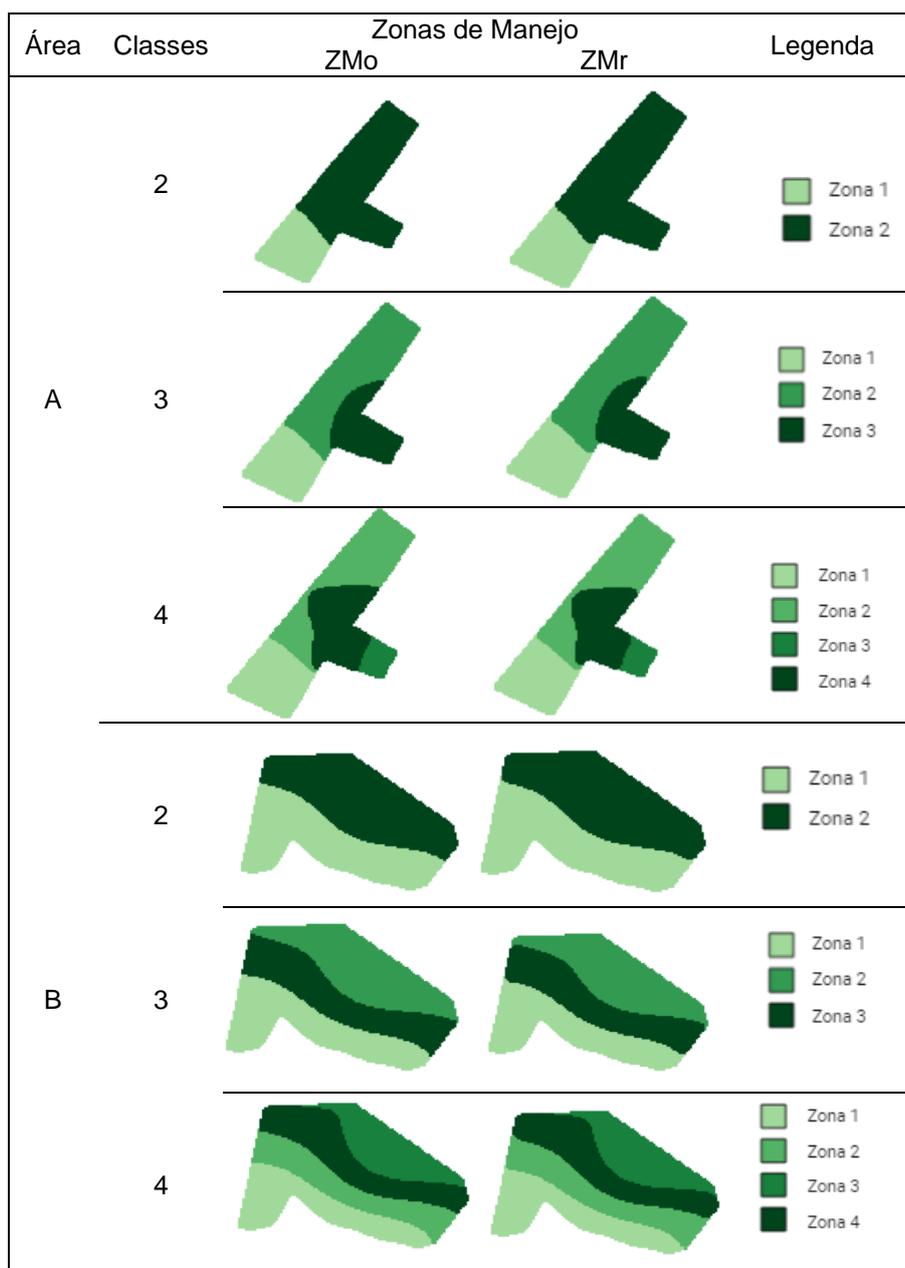


Figura 26 Zonas de manejo das áreas geradas com os atributos MO, altitude, areia e RSP 0-0,1 (área A) e altitude (área B)

5.4.1 Avaliação das zonas de manejo

Aplicou-se o teste de comparação de médias de Tukey para verificar se as ZMs geradas pelo algoritmo de agrupamento FCM apresentam produtividades médias estatisticamente diferentes entre si, a 95% significância. Assim, pode-se observar diferença significativa na produtividade média do milho, na área A, nas divisões com duas e três classes. Contudo, a área B apresentou produtividade média de soja distinta, somente na divisão com duas classes (Tabela 24).

Como FCM não indica o número ideal de agrupamentos ZMs, devem-se analisar os índices de desempenhos FPI, MPE, ICVI, ASC, Sir, IFR e MGQI. Ao se considerar que o índice ICVI é uma composição de VR, FPI e MPE e que quanto menor for seu valor, melhor será o agrupamento, pode-se concluir que para a área A, os agrupamentos com duas e três classes da área A, com o mesmo valor de ICVI (0,64), correspondem às melhores divisões para o delineamento das zonas de manejo. Já na área B, o melhor agrupamento para a definição das zonas de manejo de acordo com o ICVI (0,63) corresponde à divisão com duas classes. Como a área A obteve o mesmo valor de ICVI em dois agrupamentos distintos, pode-se utilizar o valor de MGQI de (SOBJAK, 2021) que também fornece subsídio para a escolha do número ótimo de zonas de manejo, com base nos valores ICVI, ASC, Sir e IFR. Assim, ao serem considerados os critérios deste índice, pode-se concluir que a divisão que apresentou maior suavidade no mapa retificado, menor fragmentação e menor ICVI foi a divisão por duas zonas de manejo nas duas áreas experimentais.

Esse resultado difere dos obtidos por Baio et al. (2020), que verificaram que o mapa com quatro zonas de manejo foi o mais indicado para aplicações de insumos agrícolas em taxa variáveis. O objetivo foi de aumentar a produtividade do algodão no Cerrado brasileiro, e corrobora com Barbosa et al. (2019), Bazzi et al, (2015), Córdoba et al. (2016), Ramos et al. (2017) e Yao et al. (2014) que também obtiveram os melhores resultados ao dividirem as áreas em duas zonas de manejo.

Tabela 24 Teste de Tukey e índices de avaliação para zonas de manejo

| Áreas | Classes | Teste Tukey | | | | VR% | FPI | MPE | ICVI | ASC | Sir% | IFr% | MGQI |
|-------|---------|--------------------|-------|-------|--------|-------|------|------|------|------|-------|------|------|
| | | C1 | C2 | C3 | C4 | | | | | | | | |
| | | t ha ⁻¹ | | | | | | | | | | | |
| A | 2 | 0,91a | 1,02b | | | 21,11 | 0,08 | 0,10 | 0,64 | 0,47 | 98,79 | 0 | 1,37 |
| | 3 | 1,09a | 0,99b | 0,91c | | 37,02 | 0,11 | 0,12 | 0,64 | 0,42 | 98,10 | 0 | 1,55 |
| | 4 | 1,03a | 1,06a | 0,91b | 1,00a | 25,68 | 0,12 | 0,12 | 0,75 | 0,41 | 91,19 | 0 | 2,00 |
| B | 2 | 1,52a | 1,87b | | | 39,36 | 0,06 | 0,08 | 0,63 | 0,64 | 98,46 | 0 | 0,99 |
| | 3 | 1,57a | 1,92b | 1,57a | | 30,75 | 0,07 | 0,07 | 0,69 | 0,58 | 96,92 | 0 | 1,22 |
| | 4 | 1,58b | 1,46b | 1,96c | 1,80ac | 43,17 | 0,08 | 0,07 | 0,64 | 0,55 | 95,60 | 0 | 1,21 |

Nota: VR%: Índice da redução da variância; FPI: Índice de desempenho Fuzzy; MPE: Índice da partição da entropia modificada; ICVI: Índice de validação de cluster melhorado; ASC: Índice de coeficiente de silhueta médio; Sir%: Índice de suavidade da zona de manejo retificada; IFR%: Índice de fragmentação da zona de manejo retificada; MGQI: Índice global de qualidade modificado; zonas de manejo seguidas das mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro; As classes estatisticamente diferentes estão destacadas em amarelo; O melhor agrupamento para as áreas estão destacados em rosa.

5.5 Comparação entre mapas temáticos e zonas de manejo

A Tabela 25 apresenta os valores estimados das medidas de acurácias obtidas pela matriz de confusão, kappa (Kp) e exatidão global (EG) das comparações realizadas entre os mapas temáticos e zonas de manejo originais de aplicação de ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio na cultura do milho, mapas temáticos e zonas de manejo originais de aplicação de superfosfato simples e cloreto de potássio na cultura da soja, nas duas áreas experimentais.

Com base nos respectivos índices, verifica-se que, para todas as comparações, os valores de EG foram maiores que Kp. Nota-se que a divisão das duas áreas em duas classes ou zonas de manejo foi a que apresentou os melhores resultados, com Kp considerado excelente de acordo com (COHEN, 1960), pois os valores do índice Kappa assim como os da exatidão global apresentam tendência a diminuir com o aumento das classes. Alves et al. (2013) compararam mapas de zonas de manejo com base na altitude, condutividade elétrica e na matéria orgânica com os mapas das propriedades físico-químicas do solo, e verificaram valor ótimo de número de classes igual a dois. Assim como Schenatto et al. (2016), Moreira (2019), Beneduzzi (2020) também observaram que a tendência da concordância entre os mapas foi diminuir com o aumento do número de classes.

Em relação aos métodos de recomendação dos nutrientes, observa-se que a recomendação de ureia pelo método EPMO apresentou os melhores índices, seguida da recomendação de superfosfato simples e cloreto de potássio pelo método EP. Já as recomendações pelo método de disponibilidade do nutriente no solo (DNS), na maioria das comparações, não apresentaram concordância entre os mapas, o que corrobora com os resultados encontrados por Beneduzzi (2020).

Tabela 25 Índice kappa e exatidão global na comparação entre os mapas temáticos e zonas de aplicação dos nutrientes ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio nas duas áreas experimentais

| Área | Cultura | Ano | Nutrientes | | N | | P | | K | | | | | |
|------|------------|------------|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--|
| | | | Método | | EPMO | | EP | | DNS | | EP | | DNS | |
| | | | Comparação | Kp | EG | |
| A | Milho | 2013 | MT2 vs ZM2 | 0,99 | 0,99 | 1,00 | 1,00 | 0,13 | 0,18 | 0,04 | 0,69 | 0,01 | 0,28 | |
| | | | MT3 vs ZM3 | 0,47 | 0,71 | 0,18 | 0,62 | 0,50 | 0,80 | 0,01 | 0,40 | 0,01 | 0,27 | |
| | | | MT4 vs ZM4 | 0,18 | 0,35 | 0,26 | 0,40 | 0,09 | 0,19 | 0,01 | 0,10 | 0,01 | 0,27 | |
| | | 2014 | MT2 vs ZM2 | 0,17 | 0,50 | 0,07 | 0,23 | 0,24 | 0,34 | 0,94 | 0,97 | 0,36 | 0,73 | |
| | | | MT3 vs ZM3 | 0,08 | 0,16 | 0,31 | 0,58 | 0,06 | 0,19 | 0,04 | 0,40 | 0,10 | 0,40 | |
| | | | MT4 vs ZM4 | 0,07 | 0,35 | 0,03 | 0,22 | 0,01 | 0,18 | 0,03 | 0,21 | 0,08 | 0,14 | |
| | | 2015 | MT2 vs ZM2 | 0,08 | 0,53 | 0,67 | 0,90 | 0,05 | 0,25 | 0,04 | 0,73 | 0,09 | 0,18 | |
| | | | MT3 vs ZM3 | 0,17 | 0,35 | 0,01 | 0,25 | 0,01 | 0,23 | 0,86 | 0,91 | 0,08 | 0,11 | |
| | | | MT4 vs ZM4 | 0,14 | 0,30 | 0,32 | 0,45 | 0,01 | 0,21 | 0,33 | 0,50 | 0,02 | 0,06 | |
| | Soja | 2013 | MT2 vs ZM2 | | | 0,94 | 0,99 | 0,02 | 0,16 | 0,86 | 0,96 | 0,01 | 0,28 | |
| | | | MT3 vs ZM3 | | | 0,11 | 0,35 | 0,01 | 0,08 | 0,51 | 0,72 | 0,01 | 0,27 | |
| | | | MT4 vs ZM4 | | | 0,01 | 0,26 | 0,02 | 0,07 | 0,14 | 0,22 | 0,01 | 0,27 | |
| | | 2014 | MT2 vs ZM2 | | | 0,85 | 0,94 | 0,11 | 0,61 | 1,00 | 1,00 | 0,22 | 0,43 | |
| | | | MT3 vs ZM3 | | | 0,06 | 0,49 | 0,01 | 0,44 | 0,02 | 0,02 | 0,09 | 0,23 | |
| | | | MT4 vs ZM4 | | | 0,03 | 0,35 | 0,11 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,01 | 0,20 | |
| 2015 | | MT2 vs ZM2 | | | 0,89 | 0,93 | 0,80 | 0,80 | 0,62 | 0,76 | 0,02 | 0,84 | | |
| | | MT3 vs ZM3 | | | 0,03 | 0,33 | 0,18 | 0,18 | 0,10 | 0,33 | 0,06 | 0,15 | | |
| | | MT4 vs ZM4 | | | 0,15 | 0,44 | 0,07 | 0,07 | 0,47 | 0,60 | 0,02 | 0,08 | | |
| B | Milho | 2015 | MT2 vs ZM2 | 0,98 | 0,99 | 0,65 | 0,73 | 0,94 | 0,97 | 0,89 | 0,91 | 0,99 | 0,99 | |
| | | | MT3 vs ZM3 | 0,90 | 0,93 | 0,12 | 0,26 | 0,01 | 0,02 | 0,33 | 0,71 | 0,01 | 0,48 | |
| | | | MT4 vs ZM4 | 0,28 | 0,45 | 0,07 | 0,30 | 0,02 | 0,03 | 0,32 | 0,64 | 0,06 | 0,20 | |
| | | 2016 | MT2 vs ZM2 | 0,96 | 0,98 | 0,81 | 0,87 | 0,01 | 0,47 | 0,87 | 0,94 | 0,89 | 0,96 | |
| | | | MT3 vs ZM3 | 0,05 | 0,41 | 0,01 | 0,46 | 0,01 | 0,33 | 0,01 | 0,11 | 0,01 | 0,02 | |
| | | | MT4 vs ZM4 | 0,01 | 0,24 | 0,17 | 0,37 | 0,01 | 0,26 | 0,07 | 0,13 | 0,09 | 0,81 | |
| | | 2017 | MT2 vs ZM2 | 0,75 | 0,89 | 0,63 | 0,70 | 0,01 | 0,02 | 0,83 | 0,93 | 0,86 | 0,94 | |
| | | | MT3 vs ZM3 | 0,17 | 0,26 | 0,02 | 0,20 | 0,01 | 0,02 | 0,26 | 0,54 | 0,18 | 0,25 | |
| | | | MT4 vs ZM4 | 0,42 | 0,63 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,05 | 0,01 | 0,29 | 0,22 | 0,50 | |
| | Soja | 2015 | MT2 vs ZM2 | | | 0,75 | 0,86 | 0,76 | 0,99 | 0,07 | 0,77 | 0,01 | 0,27 | |
| | | | MT3 vs ZM3 | | | 0,12 | 0,23 | 0,42 | 0,96 | 0,66 | 0,83 | 0,01 | 0,61 | |
| | | | MT4 vs ZM4 | | | 0,12 | 0,13 | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,24 | 0,01 | 0,50 | |
| | | 2016 | MT2 vs ZM2 | | | 0,67 | 0,76 | 0,01 | 0,46 | 0,49 | 0,68 | 0,01 | 0,27 | |
| | | | MT3 vs ZM3 | | | 0,04 | 0,34 | 0,01 | 0,32 | 0,97 | 0,98 | 0,01 | 0,61 | |
| | | | MT4 vs ZM4 | | | 0,09 | 0,33 | 0,01 | 0,25 | 0,48 | 0,60 | 0,01 | 0,50 | |
| 2017 | MT2 vs ZM2 | | | 0,93 | 0,97 | 0,01 | 0,46 | 0,96 | 0,98 | 0,17 | 0,22 | | | |
| | MT3 vs ZM3 | | | 0,71 | 0,82 | 0,01 | 0,32 | 0,40 | 0,62 | 0,32 | 0,71 | | | |
| | MT4 vs ZM4 | | | 0,02 | 0,27 | 0,01 | 0,25 | 0,35 | 0,56 | 0,05 | 0,51 | | | |

Nota: MT: Mapas temáticos, com 2,3 4 classes; ZM: Zonas de manejo por agrupamento com 2,3 e 4 classes; K: Grau de concordância de Kappa (Landis e Koch,1977); sem concordância (0-0.20), fraca (0.21-0.40), moderado (0.41- 0.60), forte (0.61-0.80), excelente (0.81-1);

As zonas de manejo retificadas com os mapas temáticos das recomendações dos nutrientes N, P e K também foram comparadas. No entanto, os valores obtidos para Kappa e para a exatidão global foram os mesmos apresentados na Tabela 25, pois a concordância entre as zonas de manejo originais com as zonas de manejos retificadas apresentaram valores para o índice Kappa, considerados excelentes e a exatidão global de 100%, o que indica que os mapas são iguais (Tabela 26).

Tabela 26 Índice kappa e exatidão global na comparação das zonas de manejo originais com as zonas de manejo retificadas

| Áreas | Classes | Comparações | Kappa | Exatidão Global |
|-------|---------|-------------|-------|-----------------|
| A | 2 | ZMo vs ZMr | 1,00 | 1,00 |
| | 3 | ZMo vs ZMr | 1,00 | 1,00 |
| | 4 | ZMo vs ZMr | 1,00 | 1,00 |
| B | 2 | ZMo vs ZMr | 1,00 | 1,00 |
| | 3 | ZMo vs ZMr | 1,00 | 1,00 |
| | 4 | ZMo vs ZMr | 1,00 | 1,00 |

5.6 Recomendação de NPK por zonas de manejo

Para as recomendações de NPK por zonas de manejo, as áreas A e B foram divididas em duas classes, considerado o número ideal definido pelos critérios utilizados na avaliação das zonas de manejo. Desta forma, a área A foi dividida em Zona 1 (19,18% da área) e Zona 2 (80,82%). Ao se dividir a área B, também em duas zonas de manejo, seguindo os mesmos critérios da Área A, observou-se que 45% da área passou a pertencer à Zona 1 e 55% à Zona 2, como pode ser visto na Figura 27.



Figura 27 Áreas A e B divididas em duas zonas de manejo

No período referente à recomendação de NPK, foram utilizadas as médias dos respectivos atributos em cada local, encontrados pela análise de solo em cada unidade de zona. Assim, o teste de comparação de médias de Tukey foi aplicado com o intuito de verificar se as zonas geradas pelo algoritmo de agrupamento Fuzzy c-means apresentam

diferenças significativas entre as médias dos teores dos nutrientes N-P-K. A área A apresentou diferença estatística significativa (95%) somente para as médias da MO em 2015, de P em 2014 e K em 2013 (Tabela 27).

Portanto, a quantidade necessária de ureia foi recomendada para aplicação no milho pelo método EPMO e com a média dos teores da MO disponível nas Zonas 1 e 2. Com os métodos EP e D, e com as médias dos teores de P e K correspondentes para cada zona, as doses de superfosfato simples e cloreto de potássio foram prescritas para aplicação no milho e na soja. A Tabela 19 apresenta as doses recomendadas de ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio para aplicação no milho da área A. Em relação à recomendação de N, observa-se que as doses recomendadas de ureia, a serem aplicadas em 2015, foram de (238 kg ha^{-1}) para a Zona 1 e $214 \text{ (kg ha}^{-1})$ para a Zona 2. Logo, para suprir a demanda de N por zonas de manejo seriam necessários de $5.576 \text{ (kg ha}^{-1})$ de ureia neste ano agrícola. E desses, $1.444 \text{ (kg ha}^{-1})$ deveriam ser aplicados na Zona 1 e $3.939 \text{ (kg ha}^{-1})$ na Zona 2, por esta zona corresponder a maior parte da área. Pelo teste de Tukey, verificou-se que as médias dos teores de MO de 2015 das zonas de manejo se diferem estatisticamente a 95% de significância, o que justifica a divisão da área para adubação da cultura.

A cerca das recomendações de P, com os dados do ano de 2014 as doses recomendadas de superfosfato simples pelo método EP para a Zona 1 foram de $587 \text{ (kg ha}^{-1})$ e $540 \text{ (kg ha}^{-1})$ para a Zona 2. Com essas dosagens, a Zona 1 receberia $4.029 \text{ (kg ha}^{-1})$ e $9.944 \text{ (kg ha}^{-1})$ totalizando em $13.974 \text{ (kg ha}^{-1})$ de superfosfato simples. Já pelo método D, seria necessário aplicar $1.461 \text{ (kg ha}^{-1})$ de superfosfato simples na Zona 1 e $3.678 \text{ (kg ha}^{-1})$ na Zona 2, para suprir a demanda de P. Nota-se que, para 2013 e 2015, o método D recomendou doses iguais para as duas zonas de manejo. Desse modo, a adubação poderia ser realizada de forma convencional, com dose fixa de $200,00 \text{ (kg ha}^{-1})$, a área receberia $5.049 \text{ (kg ha}^{-1})$ de superfosfato simples.

O mesmo acontece com as recomendações de K, verifica-se que os três anos agrícolas receberam a mesma dose de cloreto de potássio em ambas as zonas $58,44 \text{ (kg ha}^{-1})$. O dado revela que este método não considerou a diferença significativa constatada pelo teste de Tukey entre as médias dos teores de K das zonas de manejo. Contudo, EP calculou dosagens diferentes, o que indica que este método é mais sensível à variabilidade espacial dos nutrientes, resultado também foi observado por Beneduzzi (2020).

Tabela 27 Recomendação de ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio para aplicação no milho por zonas de manejo na área A

| Área A | | Milho | | | | | | | |
|--------------|--------|-------|-----|------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------|-----------|
| Fertilizante | Método | Ano | ZMs | Médias NPK | Recomendação (kg ha ⁻¹) | Total Zona (kg ha ⁻¹) | Total Área (kg ha ⁻¹) | | |
| Ureia | EPMO | 2013 | 1 | 38,00a | 210,80 | 1.444,90 | 5.100,26 | | |
| | | | 2 | 39,37a | 198,73 | 3.655,36 | | | |
| | | 2014 | 1 | 33,80a | 248,28 | 1.701,80 | 6.492,42 | | |
| | | | 2 | 32,42a | 260,45 | 4.790,60 | | | |
| | | 2015 | 1 | 34,85a | 238,87 | 1.637,30 | 5.576,85 | | |
| | | | 2 | 37,63b | 214,18 | 3.939,55 | | | |
| | | SS | EP | 2013 | 1 | 10,86a | 548,33 | 3.758,47 | 12.448,34 |
| | | | | | 2 | 13,95a | 472,44 | 8.689,87 | |
| 2014 | 1 | | | 8,10a | 587,90 | 4.029,70 | 13.974,20 | | |
| | 2 | | | 11,20b | 540,62 | 9.944,50 | | | |
| 2015 | 1 | | | 11,00a | 545,30 | 3.737,70 | 12.859,10 | | |
| | 2 | | | 13,03a | 495,90 | 9.121,40 | | | |
| D | 2013 | | 1 | 10,86a | 200,00 | 1.370,90 | 5.049,60 | | |
| | | | 2 | 13,95a | 200,00 | 3.678,72 | | | |
| | 2014 | | 1 | 8,10a | 213,23 | 1.461,55 | 5.140,25 | | |
| | | | 2 | 11,20b | 200,00 | 3.678,70 | | | |
| | 2015 | | 1 | 11,00a | 200,00 | 1.370,90 | 5.049,60 | | |
| | | | 2 | 13,03a | 200,00 | 3.678,72 | | | |
| Cl | EP | 2013 | 1 | 0,54a | 66,95 | 458,80 | 1.661,20 | | |
| | | | 2 | 0,62b | 66,37 | 1.202,40 | | | |
| | | 2014 | 1 | 0,34a | 103,10 | 706,75 | 2.549,95 | | |
| | | | 2 | 0,35a | 100,20 | 1.843,20 | | | |
| | | 2015 | 1 | 0,44a | 79,30 | 543,35 | 1.939,05 | | |
| | | | 2 | 0,46a | 75,90 | 1.395,70 | | | |
| | D | 2013 | 1 | 0,54a | 58,44 | 400,60 | 1.475,50 | | |
| | | | 2 | 0,62b | 58,44 | 1.704,90 | | | |
| | | 2014 | 1 | 0,34a | 58,44 | 400,60 | 1.475,50 | | |
| | | | 2 | 0,35a | 58,44 | 1.704,90 | | | |
| | | 2015 | 1 | 0,44a | 58,44 | 400,60 | 1.475,50 | | |
| | | | 2 | 0,46a | 58,44 | 1.704,90 | | | |

Nota: ZMs; Zonas de manejo; SS: Superfosfato simples; CL: Cloreto de potássio; Médias seguidas das mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro; As médias estatisticamente diferentes estão destacadas em rosa.

Em relação às recomendações de P para a soja (Tabela 28), observa-se que, em 2014, foi necessária uma dose mais alta de superfosfato simples em comparação com os outros anos. E, para este ano, foram recomendadas pelo método EP uma dose de 443,90 (kg ha⁻¹) para a Zona 1 e um dose 391,80 (kg ha⁻¹) para a Zona 2. Porém, o método D recomendou dose única de 275,00 (kg ha⁻¹) superfosfato simples, portanto, foram necessários 6.943 (kg) para adubar toda a área, 1.884 (kg) para a Zona 1 e 5.058 (kg) na

Zona 2. Assim como as recomendações de P pelo método D, as recomendações de K também resultaram em dose única 66,80 (kg ha⁻¹) de cloreto de potássio.

Tabela 28 Recomendação de superfosfato simples e cloreto de potássio para aplicação na soja por zonas de manejo na área A

| Área A | | | | Soja | | | | |
|---------------|---------|------|------|------------|--------------|------------|------------|----------|
| Fertilizantes | Métodos | Anos | ZMs | Médias NPK | Recomendação | Total Zona | Total Área | |
| SS | EP | 2013 | 1 | 10,86a | 400,00 | 2.741,75 | 8.698,70 | |
| | | | 2 | 13,95a | 323,86 | 5.956,95 | | |
| | | 2014 | 1 | 8,10a | 443,90 | 3.042,65 | 10.249,25 | |
| | | | 2 | 11,20b | 391,80 | 7.206,60 | | |
| | | 2015 | 1 | 11,00a | 396,75 | 2.719,50 | 9.091,05 | |
| | | | 2 | 13,03a | 346,40 | 6.371,55 | | |
| | D | 2013 | 1 | 10,86a | 275,00 | 1.884,95 | 6.943,20 | |
| | | | 2 | 13,95a | 275,00 | 5.058,25 | | |
| | | 2014 | 1 | 8,10a | 275,00 | 1.884,95 | 6.943,20 | |
| | | | 2 | 11,20b | 275,00 | 5.058,25 | | |
| | | 2015 | 1 | 11,00a | 275,00 | 1.884,95 | 6.943,20 | |
| | | | 2 | 13,03a | 275,00 | 5.058,25 | | |
| | CL | EP | 2013 | 1 | 0,54a | 54,25 | 371,85 | 1.175,65 |
| | | | | 2 | 0,62b | 43,70 | 803,80 | |
| 2014 | | | 1 | 0,34a | 94,60 | 648,40 | 2.342,45 | |
| | | | 2 | 0,35a | 92,10 | 1.694,05 | | |
| 2015 | | | 1 | 0,44a | 71,93 | 493,05 | 1.743,80 | |
| | | | 2 | 0,46a | 68,00 | 1.250,75 | | |
| D | | 2013 | 1 | 0,54a | 66,80 | 457,90 | 1.686,60 | |
| | | | 2 | 0,62b | 66,80 | 1.228,70 | | |
| | | 2014 | 1 | 0,34a | 66,80 | 457,90 | 1.686,60 | |
| | | | 2 | 0,35a | 66,80 | 1.228,70 | | |
| | | 2015 | 1 | 0,44a | 66,80 | 457,90 | 1.686,60 | |
| | | | 2 | 0,46a | 66,80 | 1.228,70 | | |

Nota: ZMs; Zonas de manejo; SS: Superfosfato simples; CL: Cloreto de potássio; Médias seguidas das mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro; As médias estatisticamente diferentes estão destacadas em rosa.

Apesar de as médias dos teores de matéria orgânica não apresentarem diferenças estatísticas a 95% de significância entre as zonas de manejo (Tabela 29), o método EPMO recomendou doses distintas para cada zona. Todavia, em 2014, tem-se a maior amplitude entre as doses recomendadas de ureia, Zona 1 com 228,65 (kg ha⁻¹) e Zona 2 com 249,43 (kg ha⁻¹). No total, seria necessária a aplicação de 2.057,85 (kg ha⁻¹) de ureia para suprir a demanda da Zona 1 e de 2.506,17 (kg ha⁻¹) na Zona 2.

Em relação às recomendações de superfosfato simples e cloreto de potássio, o método D não considerou as diferenças encontradas entre as médias dos teores desses atributos, pois recomendou as mesmas dosagens para ambas as zonas e para os três

anos estudados. Assim, com uma dose de 200,00 (kg ha^{-1}), seriam necessários 3.809,52 (kg ha^{-1}) de superfosfato simples para suprir a demanda de P para toda área, porém, pelo método EP, seriam necessários 4.167,74 (kg ha^{-1}) somente na Zona 2. Entretanto, a Zona 1 deveria receber 2.185,20 (kg ha^{-1}). No total, a área receberia 6.352,94 (kg ha^{-1}) de superfosfato simples. No caso do cloreto de potássio, a dose recomendada pelo método D foi de 58,45 (kg ha^{-1}) e assim, a área receberia 1.113,33 (kg ha^{-1}) desse fertilizante. Com o método EP, seria necessário um pouco mais de cloreto de potássio, 1.284,04 (kg ha^{-1}) e, desse montante, 586,44 (kg ha^{-1}) seriam aplicados na Zona 1 e 697,60 (kg ha^{-1}) na Zona 2.

Tabela 29 Recomendação de ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio para aplicação no milho por zonas de manejo na área B.

| Área B | | | | Milho | | | | | | | |
|---------------|---------|------|-----|--------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------|--------|----------|----------|
| Fertilizantes | Métodos | Anos | ZMs | Médias NPK | Recomendação (kg ha ⁻¹) | Total Zona (kg ha ⁻¹) | Total Área (kg ha ⁻¹) | | | | |
| Ureia | EPMO | 2015 | 1 | Médias de MO | 41,66a | 178,40 | 1.605,60 | 3.563,88 | | | |
| | | | 2 | | 39,80a | 194,90 | 1.958,28 | | | | |
| | | 2016 | 1 | | 36,00a | 228,65 | 2.057,85 | 4.564,02 | | | |
| | | | 2 | | 33,66a | 249,43 | 2.506,17 | | | | |
| | | 2017 | 1 | | 30,20a | 280,16 | 2.057,85 | 4564,02 | | | |
| | | | 2 | | 31,77a | 266,22 | 2.506,17 | | | | |
| | | SS | EP | | 2015 | 1 | Médias de P | 21,80a | 242,80 | 2.185,20 | 6.352,94 |
| | | | | | | 2 | | 16,10b | 414,80 | 4.167,74 | |
| 2016 | 1 | | | 22,33a | 225,40 | 2.028,42 | | 4.908,87 | | | |
| | 2 | | | 20,43a | 286,68 | 2.880,45 | | | | | |
| 2017 | 1 | | | 18,50a | 345,78 | 3.112,02 | | 5.403,07 | | | |
| | 2 | | | 22,25a | 228,02 | 2.291,05 | | | | | |
| D | 2015 | | 1 | 21,80a | 200,00 | 1.800,00 | | 3.809,52 | | | |
| | | | 2 | 16,10b | 200,00 | 2.009,52 | | | | | |
| | 2016 | | 1 | 22,33a | 200,00 | 1.800,00 | | 3.809,52 | | | |
| | | | 2 | 20,43a | 200,00 | 2.009,52 | | | | | |
| | 2017 | | 1 | 18,50a | 200,00 | 1.800,00 | | 3.809,52 | | | |
| | | | 2 | 22,25a | 200,00 | 2.009,52 | | | | | |
| CL | EP | 2015 | 1 | Médias de K | 0,67a | 68,13 | 613,17 | 1.273,30 | | | |
| | | | 2 | | 0,63a | 65,70 | 660,13 | | | | |
| | | 2016 | 1 | | 0,66a | 67,35 | 606,15 | 1.264,27 | | | |
| | | | 2 | | 0,57a | 65,50 | 658,12 | | | | |
| | | 2017 | 1 | | 0,61a | 65,16 | 586,44 | 1.284,04 | | | |
| | | | 2 | | 0,51b | 69,43 | 697,60 | | | | |
| | D | 2015 | 1 | | 0,67a | 58,45 | 526,05 | 1.113,33 | | | |
| | | | 2 | | 0,63a | 58,45 | 587,28 | | | | |
| | | 2016 | 1 | | 0,66a | 58,45 | 526,05 | 1.113,33 | | | |
| | | | 2 | | 0,57a | 58,45 | 587,28 | | | | |
| | | 2017 | 1 | | 0,61a | 58,45 | 526,05 | 1.113,33 | | | |
| | | | 2 | | 0,51b | 58,45 | 587,28 | | | | |

Nota: ZMs; Zonas de manejo; SS: Superfosfato simples; CL: Cloreto de potássio; Médias seguidas das mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro; As médias estatisticamente diferentes estão destacadas em rosa.

Assim como nas recomendações de superfosfato simples e cloreto de potássio para a cultura do milho, o método D também não considerou a diferença das médias desses atributos entre as zonas de manejo. Dessa forma, foi recomendada uma dose de 275,00 (kg ha⁻¹) totalizando em 5.238,09 (kg ha⁻¹) de superfosfato simples. Quanto ao cloreto de potássio, este método recomendou dose de 66,80 (kg ha⁻¹) para as duas zonas

de manejo nos anos estudados. Contudo, o método EP recomendou doses distintas de desses nutrientes 136,22 Zona 1 (kg ha^{-1}) e 271,65 (kg ha^{-1}) Zona 2 de superfosfato simples e 44,83 (kg ha^{-1}) Zona 1 e 59,03 (kg ha^{-1}) Zona 2 de cloreto de potássio (Tabela 30).

Tabela 30 Recomendação de superfosfato simples e cloreto de potássio para aplicação na soja por zonas de manejo na área B

| Área B | | | | Soja | | | |
|---------------|---------|------|-----|------------|--------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Fertilizantes | Métodos | Anos | ZMs | Médias NPK | Recomendação (kg ha^{-1}) | Total Zona (kg ha^{-1}) | Total Área (kg ha^{-1}) |
| SS | EP | 2015 | 1 | 21,80a | 136,22 | 1.225,98 | 3.955,41 |
| | | | 2 | 16,10b | 271,65 | 2.729,43 | |
| | | 2016 | 1 | 22,33a | 123,85 | 1.114,65 | 2.806,46 |
| | | | 2 | 20,43a | 168,38 | 1.691,81 | |
| | | 2017 | 1 | 18,50a | 214,10 | 1.926,90 | 3.189,88 |
| | | | 2 | 22,25a | 125,70 | 1.262,98 | |
| | D | 2015 | 1 | 21,80a | 275,00 | 2.475,00 | 5.238,09 |
| | | | 2 | 16,10b | 275,00 | 2.763,09 | |
| | | 2016 | 1 | 22,33a | 275,00 | 2.475,00 | 5.238,09 |
| | | | 2 | 20,43a | 275,00 | 2.763,09 | |
| | | 2017 | 1 | 18,50a | 275,00 | 2.475,00 | 5.238,09 |
| | | | 2 | 22,25a | 275,00 | 2.763,09 | |
| CL | EP | 2015 | 1 | 0,67a | 38,70 | 348,30 | 776,33 |
| | | | 2 | 0,63a | 42,60 | 428,03 | |
| | | 2016 | 1 | 0,66a | 39,60 | 356,40 | 857,78 |
| | | | 2 | 0,57a | 49,90 | 501,38 | |
| | | 2017 | 1 | 0,61a | 44,83 | 403,47 | 996,58 |
| | | | 2 | 0,51b | 59,03 | 593,11 | |
| | D | 2015 | 1 | 0,67a | 66,80 | 601,20 | 1.272,38 |
| | | | 2 | 0,63a | 66,80 | 671,18 | |
| | | 2016 | 1 | 0,66a | 66,80 | 601,20 | 1.272,38 |
| | | | 2 | 0,57a | 66,80 | 671,18 | |
| | | 2017 | 1 | 0,61a | 66,80 | 601,20 | 1.272,38 |
| | | | 2 | 0,51b | 66,80 | 671,18 | |

Nota: ZMs; Zonas de manejo; SS: Superfosfato simples; CL: Cloreto de potássio; Médias seguidas das mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro; As médias estatisticamente diferentes estão destacadas em rosa.

5.5 Análise econômica

A Tabela 31 apresenta o custo da adubação NPK para aplicação no milho e adubação PK na soja (área A) em função do sistema de manejo. Em relação à adubação nitrogenada, caso o produtor tivesse adotado tal metodologia, com relação apenas ao custo da ureia, em 2013, seria menor com o sistema convencional, R\$ 142,60 a menos em relação a zonas de manejo e R\$ 93,60 à taxa variável. Em 2014 e 2015, zonas de manejo apresentariam o menor custo. Caso o produtor tivesse aplicado essa técnica em 2014, ele economizaria R\$ 217,55 em comparação com a taxa variável e R\$ 95,05 em comparação com a agricultura convencional. Ao adotar essa técnica em 2014, o produtor economizaria R\$ 217,55 em comparação com a taxa variável e R\$ 95,05 em comparação com a agricultura convencional.

No caso da adubação fosfatada e potássica para as duas culturas, os dois métodos de recomendação também custaram menos com a adoção de zonas de manejo em todos os anos analisados. Só com o fertilizante superfosfato simples, na adubação do milho em 2014, pelo método D, o produtor pôde poupar R\$ 1.264,1 em relação à agricultura convencional e R\$ 1.322,25 em relação à taxa variável. Para aplicar esse fertilizante na soja em 2015, na quantidade recomendada pelo método EP, o custo seria de R\$ 10,45 à taxa variável e de R\$ 9,50 por zonas de manejo, ou seja, R\$ 900,00 de diferença entre esses sistemas. Ao considerar a área homogênea para adubar o milho e a soja em 2015 com cloreto de potássio pelo método EP, o produtor deixou de poupar mais de R\$ 1.000,00 em relação à agricultura de precisão por zonas de manejo. Desta forma, com base nesses resultados, pode-se dizer que o produtor dessa área gastaria menos com fertilizantes NPK, caso adotasse a técnica de zonas de manejo. Gastaria mais com ureia e superfosfato simples por taxa variável, e com o cloreto de potássio pela agricultura convencional.

Tabela 31 Custo da adubação NPK no milho e na soja em função do sistema de manejo (área A)

| Área | A | Milho | Quantidade (kg ha ⁻¹) | | | Custo (R\$) | | |
|---------------|---------|-------|-----------------------------------|----------|----------|-------------|----------|----------|
| Fertilizantes | Métodos | Ano | AC | TV | ZMs | AC | TV | ZMs |
| Ureia | EPMO | 2013 | 4.986,4 | 5.025,1 | 5.100,2 | 6.211,0 | 6.260,0 | 6.353,6 |
| | | 2014 | 6.567,0 | 6.663,2 | 6.492,4 | 8.361,8 | 8.484,3 | 8.266,7 |
| | | 2015 | 5.632,8 | 5.692,0 | 5.576,8 | 8.185,3 | 8.271,3 | 8.103,9 |
| SS | EP | 2013 | 12.935,3 | 13.054,0 | 12.448,3 | 11.746,4 | 11.854,2 | 11.304,1 |
| | | 2014 | 14.546,5 | 14.750,5 | 13.974,2 | 12.204,2 | 12.375,3 | 11.724,1 |
| | | 2015 | 13.220,6 | 13.556,4 | 12.859,1 | 13.824,2 | 14.175,3 | 13.446,2 |
| | D | 2013 | 5.795,8 | 5.821,9 | 5.049,6 | 5.263,1 | 5.286,8 | 4.585,5 |
| | | 2014 | 6.646,9 | 6.716,2 | 5.140,2 | 5.576,6 | 5.634,7 | 4.312,5 |
| | | 2015 | 5.686,2 | 5.715,0 | 5.049,6 | 5.945,8 | 5.975,9 | 5.280,1 |
| CP | EP | 2013 | 1.855,7 | 1.842,4 | 1.661,2 | 2.533,9 | 2.515,8 | 2.268,4 |
| | | 2014 | 2.847,9 | 2.847,8 | 2.550,0 | 3.621,2 | 3.621,1 | 3.242,5 |
| | | 2015 | 2.288,0 | 2.263,9 | 1.939,0 | 3.659,7 | 3.621,1 | 3.101,4 |
| | D | 2013 | 1.484,4 | 1.475,7 | 1.475,5 | 2.027,0 | 2.015,1 | 2.014,8 |
| | | 2014 | 1.734,5 | 1.734,1 | 1.475,5 | 2.205,5 | 2.205,0 | 1.876,2 |
| | | 2015 | 1.553,1 | 1.543,6 | 1.475,5 | 2.484,2 | 2.469,0 | 2.360,1 |
| Área | A | Soja | Quantidade (kg ha ⁻¹) | | | Custo (R\$) | | |
| Fertilizantes | Métodos | Ano | AC | TV | ZMs | AC | TV | ZMs |
| SS | EP | 2013 | 9.460,4 | 9.580,9 | 8.698,7 | 8.590,9 | 8.700,3 | 7.899,2 |
| | | 2014 | 11.088,9 | 11.301,6 | 10.249,2 | 9.303,4 | 9.481,8 | 8.598,9 |
| | | 2015 | 9.801,2 | 9.980,7 | 9.091,0 | 10.248,8 | 10.436,4 | 9.506,1 |
| | D | 2013 | 7.203,2 | 7.218,9 | 6.943,2 | 6.541,2 | 6.555,4 | 6.305,0 |
| | | 2014 | 7.647,6 | 7.673,4 | 6.943,2 | 6.416,2 | 6.437,8 | 5.825,2 |
| | | 2015 | 7.132,5 | 7.142,8 | 6.943,2 | 7.458,2 | 7.468,5 | 7.260,2 |
| CP | EP | 2013 | 1.216,9 | 1.247,9 | 1.175,6 | 1.661,7 | 1.704,0 | 1.605,3 |
| | | 2014 | 2.529,8 | 2.529,0 | 2.342,4 | 3.216,8 | 3.215,7 | 2.978,5 |
| | | 2015 | 1.987,0 | 1.960,0 | 1.743,8 | 3.178,2 | 3.135,0 | 2.789,2 |
| | D | 2013 | 1.686,6 | 1.684,8 | 1.686,5 | 2.303,0 | 2.300,6 | 2.302,0 |
| | | 2014 | 1.976,9 | 1.970,5 | 1.686,6 | 2.513,7 | 2.505,6 | 2.144,6 |
| | | 2015 | 1.749,6 | 1.740,8 | 1.686,6 | 2.798,6 | 2.784,4 | 2.697,7 |

Nota: ■ Maior custo; ■ Menor custo.

Ao analisar o custo da adubação NPK na área B para o produtor (Tabela 32), verifica-se que a ureia em 2015 custaria menos com a agricultura convencional, ao contrário de 2016 e 2017. Em 2016, praticamente não houve diferença entre os sistemas de manejo. Em 2017, o custo da ureia no manejo convencional seria de R\$ 6.677, com

taxa variável de R\$ 6.617 e as zonas de manejo apresentaram o menor custo R\$ 5.873, o que proporcionaria uma economia de R\$ 804,00 em relação ao manejo convencional e R\$ 744,00 em relação à taxa variável.

Em relação à adubação fosfatada para o milho e a soja, o sistema que apresenta maior economia ao produtor em todos os anos estudados é a técnica de zonas de manejo. Aplicar o fertilizante superfosfato simples em 2015 no milho com as doses recomendadas pelo método EP e pela agricultura convencional custaria R\$ 110,00 a mais caso a aplicação ocorresse por zonas de manejo. Em 2016, a diferença passou para R\$ 390,00 em 2017, a diferença foi de R\$ 429,00. Na soja, a economia é ainda maior, a diferença seria de R\$ 486 em 2015, de R\$ 678,00 em 2016, e em 2017 ocorreu a maior diferença entre esses dois sistemas - de R\$ 753,00.

A adubação potássica para as duas culturas também seria mais em conta para o produtor com a aplicação do fertilizante por zonas de manejo. Para alguns anos, o método de recomendação D que considera apenas o teor do nutriente no solo, neste caso, o potássio gerou doses iguais nos três sistemas, considerando a área homogênea. Por outro lado, o método EP recomendou doses distintas para todos os anos, evidenciando que para a aplicação do fertilizante à taxa variável o produtor necessitaria de mais recurso financeiro.

Tabela 32 Custo da adubação NPK no milho e na soja em função do sistema de manejo (área B)

| Área | B | Milho | Quantidade (kg ha ⁻¹) | | | Custo (R\$) | | |
|---------------|---------|-------|-----------------------------------|---------|---------|-------------|---------|---------|
| Fertilizantes | Métodos | Ano | AC | TV | ZMs | AC | TV | ZMs |
| Ureia | EPMO | 2015 | 3.451,4 | 3.511,0 | 3.563,8 | 5.015,4 | 5.102,0 | 5.178,8 |
| | | 2016 | 4.636,1 | 4.562,7 | 4.564,0 | 6.447,0 | 6.345,0 | 6.346,8 |
| | | 2017 | 5.188,5 | 5.141,6 | 4.564,0 | 6.677,7 | 6.617,3 | 5.873,9 |
| SS | EP | 2015 | 6.459,0 | 6.469,3 | 6.352,9 | 6.753,9 | 6.764,7 | 6.643,0 |
| | | 2016 | 5.272,3 | 5.319,6 | 4.908,8 | 5.664,6 | 5.715,5 | 5.274,1 |
| | | 2017 | 5.819,0 | 5.660,9 | 5.403,0 | 6.011,1 | 5.847,8 | 5.581,4 |
| | DNS | 2015 | 3.878,0 | 3.887,6 | 3.809,5 | 4.055,0 | 4.065,1 | 3.983,4 |
| | | 2016 | 3.809,5 | 3.809,5 | 3.809,5 | 4.093,0 | 4.093,0 | 4.093,0 |
| | | 2017 | 3.828,5 | 3.822,9 | 3.809,5 | 3.954,9 | 3.949,1 | 3.935,3 |
| CP | EP | 2015 | 1.845,7 | 1.864,8 | 1.273,3 | 2.952,2 | 2.982,8 | 2.036,6 |
| | | 2016 | 1.508,5 | 1.508,3 | 1.264,2 | 2.331,9 | 2.331,6 | 1.954,4 |
| | | 2017 | 1.552,3 | 1.559,0 | 1.284,0 | 2.217,5 | 2.227,1 | 1.834,3 |
| | D | 2015 | 1.114,2 | 1.114,7 | 1.113,3 | 1.782,1 | 1.783,0 | 1.780,7 |
| | | 2016 | 1.112,3 | 1.113,4 | 1.113,3 | 1.719,5 | 1.721,2 | 1.721,0 |
| | | 2017 | 1.137,1 | 1.141,6 | 1.113,3 | 1.624,4 | 1.630,8 | 1.590,4 |
| Área | B | Soja | Quantidade (kg ha ⁻¹) | | | Custo (R\$) | | |
| Insumos | Métodos | Anos | AC | TV | ZMs | AC | TV | ZMs |
| SS | EP | 2015 | 4.491,4 | 4.507,5 | 3955,4 | 4.078,6 | 4.093,2 | 3.591,8 |
| | | 2016 | 3.615,2 | 3.632,4 | 2806,4 | 3.033,1 | 3.047,5 | 2.354,5 |
| | | 2017 | 3.910,4 | 3.813,9 | 3189,8 | 4.089,0 | 3.988,0 | 3.335,5 |
| | D | 2015 | 5.253,3 | 5.256,6 | 5238,0 | 4.770,4 | 4.773,4 | 4.756,6 |
| | | 2016 | 5.238,0 | 5.238,0 | 5238,0 | 4.394,6 | 4.394,5 | 4.394,6 |
| | | 2017 | 5.238,0 | 5.238,0 | 5238,0 | 5.477,2 | 5.477,1 | 5.477,2 |
| CP | EP | 2015 | 1.026,6 | 1.034,5 | 776,3 | 1.401,9 | 1.412,6 | 1.060,0 |
| | | 2016 | 956,1 | 949,9 | 857,7 | 1.215,7 | 1.207,8 | 1.090,7 |
| | | 2017 | 1.095,2 | 1.126,0 | 996,5 | 1.751,8 | 1.801,0 | 1.594,0 |
| | D | 2015 | 1.272,3 | 1.272,3 | 1272,3 | 1.737,4 | 1.737,3 | 1.737,4 |
| | | 2016 | 1.272,3 | 1.272,3 | 1272,3 | 1.617,8 | 1.617,8 | 1.617,9 |
| | | 2017 | 1.272,3 | 1.299,9 | 1272,3 | 2.035,1 | 2.079,2 | 2.035,1 |

Nota: ■ Maior custo; ■ Menor custo.

Outros estudos também apontam certa viabilidade econômica em adotar as técnicas da agricultura de precisão. Cherubin et al. (2011), em pesquisa sobre a viabilidade técnica e econômica da utilização de taxa variável em área manejada com agricultura de precisão, verificaram que redução no custo da aplicação de calcário foi de 1.970,50 em relação à aplicação convencional. No caso da adubação fosfatada, a diferença entre taxa variável e taxa fixa pela média foi de R\$ 5.301,50. A adubação potássica resultou em maior investimento na taxa variável, ou seja, R\$ 1.416,00 a mais que na aplicação convencional. Contudo, as aplicações desses três insumos à taxa variável somaram R\$ 74.606,00 e no método tradicional R\$ 89.462,20, portanto, houve uma economia de R\$ 5.856,00 na área total. Os resultados desses autores corroboram com vários outros, os quais também verificaram que a aplicação em taxa variável possibilitou a racionalização de fertilizantes e corretivos (AMADO et al., 2006; DURIGON, 2007; WERNER, 2007; BELLÉ, 2009).

Moreira (2019) comparou as quantidades médias de calcário nos mesmos sistemas de manejo estudados e verificou que as menores quantidades recomendadas foram para a aplicação em zonas de manejo. Franchin et al. (2009) obtiveram economia de 6,43% na aplicação potássica por zonas de manejo em relação à adubação convencional. E no caso da adubação fosfatada, o uso da taxa variável resultou em uma economia de 2,21% em relação à zona de manejo. Bernardi et al. (2018) observaram redução no custo da produção de pastagem de Capim Tanzânia com a tecnologia de aplicação em taxa variável de calcário e superfosfato simples. Os autores também observaram aumentos dos valores do pH, P, Ca, Mg e a V%, e concluíram que a tecnologia da aplicação de insumos à taxa variável pode ser utilizada como ferramenta de correção e adubação do solo, as quais levam à maior homogeneidade dos atributos químicos do solo, e à redução do custo de produção. Dellamea (2008) verificou economia com a técnica de aplicação de fertilizantes à taxa variável em relação ao sistema tradicional e, somada ao aumento da produtividade dos grãos de soja, observou lucro de R\$ 72,05 ha⁻¹, o que equivale a aproximadamente 227,4 kg ha⁻¹ de soja.

Weirich Neto et al. (2006), ao considerarem uma área como homogênea para aplicação de corretivos e fertilizantes em sistema convencional, verificaram desequilíbrio nos nutrientes do solo. A adoção de tratamento uniforme de práticas, com base em valores médios de parâmetros usados no manejo, resulta em perdas econômicas para os agricultores, além de possíveis danos ao meio ambiente, bem como na contaminação dos recursos hídricos (lençol freático, rios, lagos) (GONÇALVES et al., 2017).

6 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos pode-se concluir que:

- Os mapas de fertilidade apresentam variabilidade espacial e temporal dos atributos químicos do solo, matéria orgânica, fósforo e potássio nas duas áreas experimentais;
- Os mapas de recomendação são uma ferramenta importante nas recomendações agrícolas, além de as aplicações de fertilizantes serem imprescindíveis na agricultura de precisão;
- Nas duas áreas foram identificadas como zonas homogêneas, as quais apresentaram melhor divisão com duas classes.
- A aplicação de fertilizantes por zonas de manejo mostrou ser mais econômica do que a agricultura convencional;
- A agricultura de precisão utiliza, de forma mais eficiente, as quantidades de fertilizantes quando comparada à agricultura convencional;
- A plataforma AgDataBox mostrou ser eficiente ao gerar os mapas temáticos de recomendações dos fertilizantes ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio para aplicação nas culturas de soja e milho à taxa variável em toda área, e na definição de zonas de manejo.

REFERÊNCIAS

- AAKER, D. A.; KUMAR, V.; DAY, G. S. **Pesquisa de marketing**. São Paulo: Atlas, p. 745, 2001.
- ANDRADE, Fernando H. Los desafios de la agricultura 1ª ed. **International Plant Nutrition Institute**, cap. 5, p. 58-77, 2016.
- ARAÚJO, L.A.N. DE, FERREIRA, M.E., CRUZ, M.C.P. Da. Adubação nitrogenada na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, p. 771-777, 2004.
- ARTUZO, F. D.; SOARES, C; WEISS, C. R. Inovação de processo: O impacto ambiental e econômico da adoção da agricultura de precisão. **Espacios**, v. 38, n. 2, p. 1-6, 2017.
- AHMAD, A. U.; STARKEY, A. Application of feature selection methods for automated clustering analysis: a review on synthetic datasets. **Neural Computing and Applications**, p. 1-12, 2017.
- ALBUQUERQUE, M. A.; SILVA, E. L.; BARROS, K. N. N. O.; JUNIOR, S. F. A. X. Comparação entre Coeficientes Similaridade uma aplicação em Ciências Florestais. **Revista Eletrônica Matemática e Estatística em Foco**. v. 4, n. 2, p. 102-114, 2016.
- ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M.; URQUIAGA, S. The success of BNF in soybean in Brazil. **Plant and Soil**, v. 252, p. 1-9, 2003.
- ALVES, V. S. B. **Eficiência de genótipos de soja no uso do fósforo**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Agronomia. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.781>.
- ARNO, J.; MARTINEZ-CASASNOVAS, J. A.; RIBES-DASI, M.; ROSELL, J. R. Clustering of grape yield maps to delineate site-specific management zones. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 9, n. 3, p. 721-729, 2011.
- ASHLEY, A.K; CORDELL, D.; MAVINIC, D. **A brief history of phosphorus: from the philosopher's stone to nutrient recovery and reuse**. Chemosphere, 84, p. 737-746, 2011.
- AWAN S. A review of the past, present and future of precision agriculture in the UK. **In Cereals & Oilseeds is a part of the Agriculture and Horticulture Development Board (AHDB)**, 2017.
- BÁRBARO, I. M.; BRANCALIÃO, S. R.; TICELLI, M.; MIGUEL, F. B.; SILVA, J. A. A. Técnica alternativa: co-inoculação de soja com *Azospirillum* e *Bradyrhizobium* visando incremento de produtividade. **Infobibos**, 2008. Acesso em: fevereiro 2018.
- BÁRBARO, I. M.; MACHADO, P. C.; BÁRBARO JUNIOR, L. S., TICELLI, M., MIGUEL, F. B., SILVA, J. A. A. da. Produtividade da soja em resposta á inoculação padrão e coinoculação *Colloquium*. **Agrariae**, v. 5, n. 1, p. 1-7, 2009.
- BARBOZA, E.; MOLINE, E. F. V.; BLIND, A. D. et al. Desenvolvimento de plantas de milho em função de doses de potássio em um latossolo de Rondônia. **Enciclopédia Biosfera**, p. 355-361, 2011.

BAZZI, C. L. **Software para definição e avaliação de unidades de manejo em agricultura de precisão**. Cascavel: Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2011. 111 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual Do Oeste Do Paraná, Cascavel.

BAZZI C. L., SOUZA E. G., URIBE-OPAZO M. A., NOBREGA L. H., ROCHA D. M. Management zones definition usings oil chemical and physical attributes in a soybean area. **Engenharia Agrícola** p. 952-964, 2013.

BAZZI, C. L.; SCHENATTO, K.; UPADHYAYA, S.; UPADHYAYA, S.; ROJO, F.; KIZER, E.; KO-MADDEN, C. Optimal placement of proximal sensors for precision irrigation in tree crops. **Precision Agriculture**, p. 1-12, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11119-018-9604-3>. Acesso em: 10/12/2018.

BAZZI, C. L., JASSE, E. P., MAGALHÃES, P. S. G., MICHELON, G. K., SOUZA, E. G., SCHENATTO, K., SOBJAK, R. (2019a). AgDataBox API – Integration of data and software in precision agriculture, **SoftwareX**, 10.

BAZZI, C. L., SOUZA, E. G., SCHENATTO, K., BETZEK, N. M., GAVIOLI, A. (2019b). A software for the delineation of crop management zones (SDUM). **Australian Journal of Crop Science**. Southern Cross Journals, p. 26-34.

BELTRAME, A. B. **Interação Phytophthora nicotianae-porta-enxerto de citros (tangerina Sunki e citrumelo Swingle): efeito no sistema radicular, aspectos fisiológicos e bioquímicos**. 137f., 2010. Tese de Doutorado. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2010.

BENEDUZZI, H. M. **Módulo computacional para cálculo da necessidade de nitrogênio, fósforo e potássio a partir de suas disponibilidades no solo**. 2020. 111f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2020.

BERNARDI, A. C. et. al. Ferramentas de agricultura de precisão como auxílio ao manejo da fertilidade do solo. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 32, n. 1/2, p. 211-227, 2017.

BEHERA, S. K., MATHUR, R. K., SHUKLA, A. K., SURESH, K., PRAKASH, C. Spatial variability of soil properties and delineation of soil management zones of oil palm plantations grown in a hot and humid tropical region of southern India. **Catena**, p. 251-259, 2018.

BEZDEK, J.; EHRLICH, R.; FULL, W. FCM: The Fuzzy c-Means Clustering Algorithm. **Computers & Geosciences**, v. 10, n. 2-3, p. 191-203, 1984.

BETZEK, N. M.; SOUZA, E. G. DE; BAZZI, C. L.; SCHENATTO, K.; GAVIOLI, A. Rectification methods for optimization of management zones. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 146, February, p. 1-11, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.01.014>. Acesso em: 10/12/2018.

BETZEK, N. M.; DE SOUZA, E. G.; BAZZI, C. L.; BETZEK, N. M.; DE SOUZA, E. G.; BAZZI, C. L.; SCHENATTO, K.; GAVIOLI, A.; MAGALHÃES, P. S. G. Computational routines for automatic selection of the best parameters used by interpolation methods to create thematic maps. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 157, p. 1-41, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.004>. Acesso em: 10/12/2018

BIER, V. A.; SOUZA, E. G. Interpolation selection index for delineation of thematic maps. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 136, p. 202-209, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2017.03.008>. Acesso em: 10/12/2018.

BLACKMORE, S. The interpretation of trends from multiple yield maps. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 26, n. 1, p. 37-51, 2000.

BOERMA, H. R.; SPECHT, J.E. Soybeans: improvement, production and uses. 3rded. Madison: **American Society of Agronomy**, 2004. 1180p.

BORGES, L. F.; BAZZI, C. L.; MICHELON, G. K.; JASSE, E. P.; EDUARDO, G. S. Plataforma web para geração de mapas temáticos em agricultura de precisão. In: D. L. ROSALEN; R. P. SILVA; J. E. P. TURCO (Orgs.) **Novas tecnologias e inovações na engenharia**. p. 1041-1050, 2017.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades do solo**. 3ª edição. Porto Alegre: Bookman Editora LTDA. 2013, 683 p.

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

BURROUGH, P. A. **Principals of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment**. Oxford, Clarendon Press, p. 194, 1986.

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 America Journal**, Madison, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.

CANTARELLA, H.; RAIJ, B. van. **Adubação nitrogenada no Estado de São Paulo**. In: SANTANA, M. B. M. (Coord.). Adubação nitrogenada no Brasil. Ilhéus: CEPLAC/SBCS, p. 47-49, 1986.

CARVALHO, L. R. de, et al. Qualidade fisiológica de sementes de soja submetida a diferentes formas de aplicação de fósforo. Gl. **Sci. Technol.**, Rio Verde, v. 08, n. 01, p. 185-192, Jan./ Abr., 2015.

CASSINI, S. T. A. & FRANCO, M. C. Fixação biológica de nitrogênio: microbiologia, fatores ambientais e genéticos. In. **Vieira, C.**; Paula Júnior, T. J. & Borém, A. (ed.). Feijão. Viçosa: Editora UFV, p. 143-170, 2013.

CASTLE, M. H., LUBBEN, B.D., LUCK, J.D. Factors Influencing the Adoption of Precision Agriculture Technologies by Nebraska Producers. Presentations, Working Papers, and Gray Literature. **Agricultural Economics**, p. 49, 2016.

CHAVES, A. P.; CHIEREGATI, A. C. – **Estado da Arte em Tecnologia Mineral no Brasil**. CGEE – Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, Maio, 220 p., 2002.

CID-GARCIA, N. M.; BRAVO-LOZANO, A. G.; RIOS-SOLIS, Y. A. A crop planning and realtime irrigation method based on site-specific management zones and linear programming. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 107, p. 20-28, 2014.

COELHO, A. M.; FRANÇA, G. E. de; PITTA, G. V. E.; ALVES, V. M. C.; HERMANI, L. C. Nutrição e adubação do milho. Sete Lagoas: **Embrapa Milho e Sorgo**, 2011. 10p.

COHEN, S.; COHEN, Y.; ALCHANATIS, V.; LEVI, O. Combining spectral and spatial information from aerial hyperspectral images for delineating homogenous management zones. **Biosystems Engineering**, v. 114, n. 4, p. 435-443, 2013.

CÓRDOBA, M.; BALZARINI, M.; BRUNO, C.; COSTA, J. L. Análisis de componentes principales con datos georreferenciados: Una aplicación en agricultura de precisión. **Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCUYO**, v. 44, n. 1, p. 27-39, 2012.

CÓRDOBA, M.; BRUNO, C.; COSTA, J. L.; BALZARINI, M. Subfield management class delineation using cluster analysis from spatial principal components of soil variables. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 97, p. 6-14, 2013.

CRESSIE, N. A. C. **Statistics for Spatial Data, Revised Edition**. John Wiley e Sons, New York, 928, p. 1993.

CZAPLEWSKI, R. L., REICH, R. M., 1993. **Expected Value and Variance of Moran's Bivariate Spatial Autocorrelation Statistic under Permutation**. Department of Agriculture, Fort Collins, USA, p. 13.

DAVATGAR N., NEISHABOURI M.R., SEPASKHAH A.R. 2012. Delineation of site specific nutrient management zones for a paddy cultivated area based on soil fertility using fuzzy clustering. **Geoderma** p. 173-174

DELGADO J. A., KHOSLA R., WAUSCH W. C., WESTFALL D. G., INMAN D. J. Nitrogen fertilizer management based on site-specific management zones reduces potential for nitrate leaching. **Journal of Soil and Water Conservation**, p. 402-410, 2015.

DIEST, V. A. Volatilización del amoníaco en los suelos anegados, y sus repercusiones en El rendimiento de arroz. **Noticiarios de la Comisión Internacional del Arroz**. FAO, Rome, v. 37, p. 1-6, 1988.

DIKER, K.; HEERMANN, D. F.; BRODAHL, M. K. Frequency analysis of yield for delineating yield response zones. **Precision Agriculture**, v. 5, p. 435-444, 2004.

DOERGE, T. A. Management Zone Concepts. **Site-Specific Management Guidelines**, p. 1-4, 2000.

DRAY, S.; SAID, S.; DÉBIAS, F. Spatial ordination of vegetation data using a generalization of Wartenberg's multivariate spatial correlation. **Journal of Vegetation Science**, v. 19, p. 4556, 2008.

DRIEMEIER, C.; LING, L. Y.; SANCHES, G. M.; PONTES, A. O.; MAGALHAES, P. S. G.; FERREIRA, J. R. A computational environment to support research in sugarcane agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 130, p. 13-19, 2016.

DUETE, R. R. C.; MURAOKA, T.; SILVA, E. C.; TREVILIN, P. C. O.; AMBROSANO, E. J. Manejo da adubação nitrogenada e utilização do nitrogênio (15N) pelo milho em Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 161-171, 2008.

DUETE, R. R. C.; MURAOKA, T.; SILVA, E. C.; TREVILIN, P. C. O.; AMBROSANO, E. J. Viabilidade econômica de doses e parcelamentos da adubação nitrogenada na cultura do milho em Latossolo Vermelho Eutrófico. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 31, p. 175-181, 2009.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**, 2ª ed., Rio de Janeiro, 212p. 1997.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA EMBRAPA. **Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos.** Rio de Janeiro, 306 p. 2006.

EMBRAPA. Tecnologias de Produção de Soja – Região Central do Brasil 2014. Londrina: Embrapa, 2014, 265 p. (Sistemas de produção, 16).

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas.** Londrina: Editora Planta, 2006.

ERICKSON, B., J. LOWENBERG-DEBOER; J. BRADFORD. 2017. **2017 Precision agriculture dealership survey.** Departments of Agricultural Economics and Agronomy, Purdue University, West Lafayette, 2018.

EVANS, H. J.; BURRIS, R. H. Highlights in Biological Nitrogen Fixation during the last 50 years. In: STACEY, G.; BURRIS, R.H.; EVANS, H.J eds. **Biological Nitrogen Fixation.** New York: Chapman and Hall, 1992, p.1-42.

FAHAD, A.; ALSHATRI, N.; TARI, Z.; ALAMRI, A.; KHALIL, I.; ZOMAYA, A. Y.; FOUFOU, S.; BOURAS, A. A survey of clustering algorithms for big data: Taxonomy and empirical analysis. **IEEE transactions on emerging topics in computing**, v. 2, n. 3, p. 267-279, 2014.

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. **Produção de milho.** Guaíba: Agropecuária, 2000. 360p.

FAO - Organização Das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura. FAO no Brasil. **Food and Agricultural Organization**, 2017.

FAYYAD, U. M. Diving into databases: SQL is helpless in the face of massive, accumulating data stores. **Database programming and design**, v. 11, n. 3, p. 24-31, mar., 1998.

FERNANDEZ-CORNEJO, J., S. DABERKOW, AND W. MCBRIDE. Decomposing the size effect on the adoption of innovations: Agro biotechnology and precision agriculture. **AgBioForum**. p. 124-136, 2001.

FERGUSON, R. B. **Precision agriculture in the United States: practices and opportunities.** Lincoln: Department of Agronomy and Horticulture University of Nebraska, 2015.

FERNANDES, M. S. **Nutrição mineral de plantas.** Viçosa: SBCS, 2006. 432p.

FERRAZ, G. A. E. S.; SILVA, F. M.; CARVALHO, F. M.; COSTA, P. A. N.; CARVALHO, L. C. C. Viabilidade econômica do sistema de adubação diferenciado comparado ao sistema de adubação convencional em lavoura cafeeira: um estudo de caso. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 5, p. 906-915, 2011.

FERREIRA, A. C. B.; ARAÚJO, G. A. A.; PEREIRA, P. R. G. P.; CARDOSO, A. A. Características agronômicas e nutricionais do milho adubado com nitrogênio, molibdênio e zinco. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 58, n. 1, p. 131-138, 2001.

FERREIRA, J.R. A computational environment to support research in sugarcane agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 130, p. 13-19, 2016.

Fixação biológica de nitrogênio. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

FOLONI, J. S. S.; CALONEGO, J. C.; CATUCHI, T. A.; BELLEGGIA, N. A.; TIRITAN, C. S.; BARBOSA, A. M. Cultivares de milho em diferentes populações de plantas com espaçamento reduzido na safrinha. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 13, n. 3, p. 312-325, 2014.

FOLONI, J. S. S.; ROSOLEM, C. A. Produtividade e acúmulo de potássio na soja em função da antecipação da adubação potássica no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 4, p. 1549-1561, 2008.

FOUNTAS, S., AGGELOPOULOU, K., GEMTOS, T. A. **Precision Agriculture**. In Supply Chain Management for Sustainable Food Networks, p. 41-65, 2016. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd. <http://doi.org/10.1002/9781118937495.ch2>.

FRAISSE, C. W.; SUDDUTH, K. A.; KITCHEN, N. R. Delineation of site-specific management zones by unsupervised classification of topographic attributes and soil electrical conductivity. **International Journal of the American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 44, n. 1, p. 155-166, 2001.

FRANZEN D. W., HOPKINS D. H., SWEENEY M. D., ULMER M. K., HALVORSON A. D. Evaluation of soil survey scale for zone development of site-specific nitrogen management. **Agronomy Journal**, 2002, p. 381-389.

FREITAS, V. C. I.; RODRIGUES, B. M. Fixação biológica do nitrogênio na cultura do milho. **Agropecuária Técnica**, v. 31, n. 2, 2010.

FRIDGEN, J. J.; KITCHEN, N. R.; SUDDUTH, K. A.; DRUMMOND, S. T.; WIEBOLD, W. J.; FRAISSE, C. W. Management zone analyst (MZA): software for subfield management zone delineation. **Agronomy Journal**, v. 96, n. 1, p. 100-108, 2004.

GABRIEL, S. G.; BUENO, A. C.; SANTOS, R. F. Resposta da soja (*Glycine max* L.) à duas diferentes fontes de potássio. **Revista UNINGÁ Review**, v. 25, n. 1, p. 5-9, Paraná, 2016.

GAVIOLI, A.; SOUZA, E. G.; BAZZI, C. L.; GUEDES, L. P. C.; SCHENATTO, K. Optimization of management zone delineation by using spatial principal components. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 127, p. 302-310, 2016.

GAVIOLI, A. **Módulos computacionais para seleção de variáveis e análise de agrupamento para definição de zonas de manejo**. 2017. 122f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2017.

GEBBERS, R.; ADAMCHUK, V. I. Precision agriculture and food security. **Science**, 2010, p. 828-831.

GOES, R. J.; RODRIGUES, R. A. F.; TAKASU, A. T.; ARF, O. Características Agronômicas e Produtividade do Milho sob fontes e doses de nitrogênio em cobertura no inverno. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 12, n. 3, p. 250-259, 2013.

GOMES, J. B. V.; CURI, N.; MOTTA, P. E. F.; KER, J. C.; MARQUES, J. J. G. S. M.; SCHULZE, D.G. Análise de componentes principais de atributos físicos, químicos e mineralógicos de solos do bioma cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 137-153, 2004.

GOMES, M. A. F.; DE SOUZA, M. D.; BOEIRA, R. C.; DE TOLEDO, L. G. Nutrientes vegetais no meio ambiente: ciclos biogeoquímicos, fertilizantes e corretivos. Embrapa

Meio Ambiente. Documentos, 18. Jaguariúna: **Embrapa Meio Ambiente**, 2000. 50 p.

GONÇALVES, J. R. M. R. **Análise ambiental e econômica comparativa de métodos de amostragem do solo utilizadas em agricultura de precisão**. 79f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola e Ambiental) Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2017.

GUARESCHI, R. F.; GAZOLLA, P. R.; PERIN, A.; SANTINI, J. M. K. Adubação antecipada na cultura da soja com superfosfato triplo e cloreto de potássio revestidos por polímeros. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 4, p. 643-648, jul./ago., 2011.

GUEDES, E. M. S.; FERNANDES, A. R.; LIMA, H. V.; SERRA, A. P.; COSTA, J. R.; GUEDES, R. S. Impacts of different management systems on the physical quality of an Amazonian Oxisol. Revista **Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 4, p. 1269-1278, 2012.

GUESSER, P. V.; MISSIO, E.; RUSSINI, A.; PINHO, J. P. Adubação organomineral e mineral e resposta da soja em terras baixas. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 7, n. 1, p. 2376-2390, Jan., 2021.

GUO, C.; ZHANG, L.; ZHOU, X.; ZHU, Y.; CAO, W.; QI, X.; CHENG, T.; TIAN, Y. Integrating remote sensing information with crop model to monitor wheat growth and yield based on simulation zone partitioning. **Precision Agriculture**, p. 55-78, 2018.

HAIR, J. F.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. **Análise de regressão múltipla**. Tradução SCHELUP, A.; CHAVES, A. 5ª ed., Porto Alegre: Bookman, 2005.

HAIR JÚNIOR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. **Análise multivariada de dados**. Porto Alegre: Bookman, p. 688, 2009.

HEDLEY, C. The role of precision agriculture for improved nutrient management on farms. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 95, n. 1, p. 12-19. 2015.

HOTELLING H. **Analysis of a complex of statistical variables into principal components**. The J. Educ. Psychol. p. 498-520, 1933. DOI: 10.1037/h0071325 10.

HOTELLING H. **Simplifield calculation of principal components**. Psychometrika, 1936.

ILIADIS, L. S.; VANGELOU DH, M.; SPARTALIS, S. An intelligent system employing an enhanced fuzzy c-means clustering model: application in the case of forest fires. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 70, n. 2, p. 276-284, 2010.

HUNGRIA, M.; CAMPO, R. J.; MENDES, I. C. **Fixação biológica do nitrogênio na cultura da soja**. EMBRAPA, 2001, 48p. (Circular Técnica, 35).

HUNGRIA, M.; CAMPO, R.J.; MENDES, I.C. A importância do processo de fixação biológica do nitrogênio para a cultura da soja: componente essencial para a competitividade do produto brasileiro. Londrina: **Embrapa soja**, 2007, 80p.

HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J. C.; CAMPO, R. J. & GRAHAM, P. H. The importance of nitrogen fixation to soybean cropping in South America. In: WERNER, D. & NEWTON, W., eds. Nitrogen fixation in agriculture, forestry, ecology and the environment. **Dordrecht, Springer**, p.25-42, 2005.

ILIADIS, L. S.; VANGELOU DH, M.; SPARTALIS, S. An intelligent system employing an enhanced fuzzy c-means clustering model: Application in the case of forest fires.

Computers and Electronics in Agriculture, v. 70, n. 2, p. 276-284, 2010.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989, 561p.

JOLY F. **A Cartografia**. Editora Papirus, São Paulo, 8ª edição, 2006.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied Multivariate Statistical Analysis**. 6ª ed. New Jersey: Pearson, 2007, 773 p.

LANA, M. C.; RAMPIM, L.; OHLAND, T.; FÁVERO, F. Spacing, population density and nitrogen fertilization in corn grown in an Oxisoil. **Revista Ceres**, v. 61, n. 3, p. 424-433, 2014.

LANTMANN, A. F.; OLIVEIRA, E. L.; CHAVES, J. C. D.; PAVAN, A. Adubação no Estado do Paraná. In: **SANTANA**, M. B. M. (Coord.). Adubação nitrogenada no Brasil. Ilhéus: CEPLAC/SBCS, p. 19-46, 1986.

LI, X.; PAN, Y.; GE, Z.; ZHAO, C. Delineation and scale effect of precision agriculture management zones using yield monitor data over four years. **Agricultural Sciences in China**, v. 6, n. 2, p. 180-188, 2007.

LI, Y.; SHI, Z.; WU, H.; LI, F.; LI, H. Definition of management zones for enhancing cultivated land conservation using combined spatial data. **Environmental Management**, v. 52, n. 1, p. 792-806, 2013.

LIANG, X.; LIAKOS, V.; WENDROTH, O.; VELLIDIS, G. Scheduling irrigation using an approach based on the van Genuchten model. **Agric. Water Manag.**, p. 170-179, 2016.

LIMA, M. D.; PELUZIO, J.; MANDARINO, J. M. G.; LIMA, D. Potassium fertilization and sowing seasons on protein yield in soybean cultivars. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, p. 392-397, 2017. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n6p392-397>.

LLEIDA UNIVERSITY. **Principal precision agriculture definitions retrieved from the scientific literature and from the web**. http://www.grap.udl.cat/en/presentation/pa_definitions.html, 2018.

LINDEN, R. Técnicas de agrupamento. **Revista de Sistemas de Informação da FSMA**, v. 1, n. 4, p. 18-36, 2009.

LIU, Q.; CHU, X.; XIAO, J.; ZHU, H. Optimizing Non-orthogonal Space Distance Using PSO in Software Cost Estimation. In: IEEE Computer Software Applications Conference (COMPSAC). **Anais...**, 2014.

LOUREIRO, F. E. L.; MONTE, M. B. M.; NASCIMENTO, M. Fosfato. In: LUZ, Adão Benvindo da.; LINS, Fernando Antônio Freitas. **Rochas e Minerais Industriais: Usos e Especificações**. 2ª ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, p. 141-171, 2005.

LOWENBERG, J. D., ERICKSON, B. Setting the Record Straight on Precision Agriculture Adoption. **Agronomy Journal**, v.111, 2019.

LOCH, R.; NOGUEIRA, E. **Cartografia**: representação, comunicação e visualização de dados espaciais. Ed. UFSC. No prelo. 2005.

KAPPES, C.; ARF, O.; DAL BEM, E. A.; PORTUGAL, J. R.; GONZAGA, A. R. Manejo do

nitrogênio em cobertura na cultura do milho em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 13, n. 2, p. 201-217, 2014.

KAPPES, C.; ANDRADE, J. A. C.; ARF, O.; OLIVEIRA, A. C.; ARF, M. V.; FERREIRA, J. P. Desempenho de híbridos de milho em diferentes arranjos espaciais de plantas. **Bragantia**, Campinas, v. 70, n. 2, p. 334-343, 2011.

KENDALL, H., P. NAUGHTON, B. CLARK, J. TAYLOR, Z. LI, C. ZHAO, G. YANG, et al. Precision agriculture in China: Exploring awareness, understanding, attitudes and perceptions of agricultural experts and end-users in **China**. **Adv. Anim. Biosci.** p. 703-707, 2017. doi:10.1017/S2040470017001066.

KITCHEN, N. R. SUDDUTH, K. A., MYERS, D. B. Delineating productivity zones on claypan soil fields using apparent soil electrical conductivity, **Computer and Electronics in Agriculture**, v. 46, issue 1-3, p. 285-308, 2005.

KORNDORFER, G. H.; CABEZAS, L.; WALDO, A. & HOROWITZ, N. [Online] **Eficiência agrônômica de fosfatos naturais reativos na cultura do milho**, 2005. Homepage: http://www.sielo.br/sielo.php?script=sci_arttext&pid=s010390161999000200019&lng=pt&nrn=iso

MACQUEEN, J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In: Proceedings of 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Berkeley. **Anais**. Berkeley: University of California Press, p. 281-297, 1967.

MAJEROWICZ, N., PEREIRA, J.M.S., MEDICI, L.O., BISON, O., Pereira, M.B., Júnior, U.M.S. (2002) Estudo da eficiência de uso do nitrogênio em variedades locais e melhoradas de milho. **Revista Brasileira Botânica**, 25(2):129-136.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Ceres, 1980.

MALAVOLTA, E. **Manual de química agrícola: adubos e adubação**. 3^a ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Editora CERES Ltda, 2006. MALAVOLTA, E.; GOMES, F. P.; ALCARDE, J. C. Adubos e adubações. [S. l.: s. n.], 2000.

MALAVOLTA E. O futuro da nutrição de plantas tendo em vista aspectos agrônômicos, econômicos e ambientais. **Informações Agronômicas**, n. 121, SP: IPNI. 24p, 2008.

MALAVOLTA, E.; GOMES, F. P.; ALCARDE, J. C. **Adubos e adubações**. São Paulo: Nobel, 2002.

MANTOVANI, A.; RIBEIRO, F. J.; VEIGA, M.; ZILIO, M.; FELICIO, T. P. Métodos de aplicação de potássio na soja em nitrossolo vermelho. **Unoesc & Ciência**. v. 8, n. 2, p. 169-176, 2017.

MARIN, R. da S. F., BAHRY, C. A., NARDINO, M., ZIMMER, P. D. Efeito da adubação fosfatada na produção de sementes de soja. **Rev. Ceres**, Viçosa, v. 62, n.3, p. 265-274, mai./jun., 2015.

MAHALANOBIS, P. C. **On The Generalized Distance in Statistics**. **Proc. Natl. Inst. Sci.** India, p. 49-55, 1936.

MATHERON, G. Principles of Geostatistics. **Economic Geology**, Lancaster, v. 58, n. 1, p.

1246-1266, 1963.

MCBRATNEY, A. B. MOORE, A. W. Application of fuzzy sets to climatic classification. **Agricultural and Forest Meteorology**, p. 165-185, 1985.

MEYER, A. da S. **Comparação de coeficientes de similaridade usados em análises de agrupamento com dados de marcadores moleculares dominantes**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, ESALQ/USP, 2002.

MELO, F. B.; CORÁ, J. E.; CARDOSO, M. J. Fertilização nitrogenada, densidade de plantas e rendimento de milho cultivado no sistema plantio direto. **Revista Ciência Agrônômica**. v. 42, n. 1. Fortaleza Jan./Mar., 2011. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rca/v42n1/v42n1a04.pdf>. Acesso: 02/05/2014.

MENEGHINI, A. L.; LOPES, L. C.; ANDRADE, A. E.; LUIZ ANTÔNIO ZANÃO JÚNIOR, L. Fontes e doses de adubação nitrogenada na cultura do milho segunda safra. **Revista Cultivando o Saber**. Volume 13 - n° 1, p. 1 a 8. Janeiro a março de 2020.

MEURER, E. J.; WANG, G. M.; WANG, S. R. Função dos nutrientes e sintomas de deficiências. In: **MIYASAKA, S.; MEDINA, J.C.**, ed. A soja no Brasil. Campinas: ITAL, 1981. p.156-167. Biblioteca(s): Embrapa Soja.

MIAO Y.; MULLA D. J.; BATCHELOR W. D.; PAZ J. O.; ROBERT P. C.; WIEBERS M. Evaluating management zone optimal nitrogen rates with a crop growth model. **Agronomy Journal**, 2006, p. 545-553.

MILANI, L.; SOUZA E. G.; URIBE-OPAZO, M. A.; GABRIEL FILHO, A.; JOHANN, J. A.; PEREIRA J.O. Unidades de manejo a partir de dados de produtividade. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 28, n. 4, p. 591-598, 2006.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. **FuzME 3.0**. Australian Centre for Precision Agriculture. Sydney: The University of Sydney, 2002.

MOLIN, J. P.; CASTRO, C. N. Establishing management zones using soil electrical conductivity and other soil properties by the fuzzy clustering technique. **Scientia Agricola**, v. 65, n. 6, p. 567-573, 2008.

MOLIN, J. P.; FAULIN, G. C. Spatial and temporal variability of soil electrical conductivity related to soil moisture. **Scientia Agricola**, v. 70, n. 1, p. 1-5, 2013.

MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R.; COLAÇO, A. Agricultura de Precisão. São Paulo: **Oficina de Textos**, 2015.

MORAL, F. J.; TERRÓN, J. M.; SILVA, J. R. M. Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. **Soil and Tillage Research**, v. 106, n. 2, p. 335-343, 2010.

MOREIRA, F. M. S.; SILVA, K.; NÓBREGA, R. S. A.; CARVALHO, F. Bactérias diazotróficas associativas: diversidade, ecologia e potencial de aplicações. **Comunicata Scientiae**, v. 1, p. 74-79, 2010.

MOREIRA, W. K. O. **Módulo computacional para delineamento de mapas de aplicação de calcário a partir dos atributos químicos do solo**. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), Cascavel, 2019.

MOTA, M. R.; SANGOI, L.; SCHENATTO, D.E.; GIODANI, W.; BONIATTI, C.M.; DALL'LGNA, L.. Fontes estabilizadas de nitrogênio como alternativa para aumentar o rendimento de grãos e a eficiência de uso do nitrogênio pelo milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, p. 512–522, 2015.

MOTERLE, L. M.; SANTOS, R. F. DOS; LUCCA, E.; BRACCINI, A. DE, SCAPIM, C. A. LANA M. DO C. Influência da adubação com fósforo e potássio na emergência das plântulas e produtividade da cultura da soja. **Revista Ciência Agrônômica**, p. 256-265, 2009.

MULLA, D. J. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. **Biosyst. Eng.** 2013, 114:358–371. doi:10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009.

MULLA D.; MIAO Y. **Precision farming**. In: Thenkabail PS, ed. Land Resources Monitoring, Modeling, and Mapping with Remote Sensing. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC, 161–178, 2016.

NOGARA NETO, F.; ROLOFF, G.; DIECKOW, J.; MOTTA, A. C. V. Atributos de solo e cultura espacialmente distribuídos relacionados ao rendimento do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1025-1036, 2011.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. Fósforo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). Viçosa, MG: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, p. 471-550, 2007.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. S. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999, 399p.

NAWAR S.; CORSTANJE R, HALCRO G, MULLA D, MOUAZEN A M. Delineation of soil management zones for variable rate fertilization: a review. **Advances in Agronomy**, 2017, p. 175–245.

NUNES, R. S.; SOUSA, D. M. G.; GOEDERT, W. J.; VIVALDI, L. J. Distribuição de fósforo no solo em razão do sistema de cultivo e manejo da adubação fosfatada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 3, p. 877-888, 2011.

ODEH, I. O. A; MCBRATNEY, A. B.; CHITTLEBOROUGH, D. J. Spatial prediction of soil properties from landform attributes derived from a digital elevation model. **Geoderma**, v. 63, p. 197-214, 1994.

OKUMURA, R. S.; MARIANO, D. C.; ZACCHEO, P. V. C. Uso de fertilizante nitrogenado na cultura do milho: uma revisão. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, Guarapuava-PR, v. 4, n. 2, p. 226-244, 2011.

OLIVEIRA, F. C.; NETTO, M. S.; ARAÚJO, L. S.; ALMEIDA, A. C. S.; SILVEIRA, P. Q.; CUNHA, P. C. R. Corn development and production in function of sources of nitrogen fertilizers and doses. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 29, n. 4, p. 812-821, 2016.

PARIZ, C. M.; ANDREOTI, M.; AZENHA, M. V.; BERGAMASCHINE, MELLO, L. M. M.; LIMA, R. C. Produtividade de grãos de milho e massa seca de braquiárias em consórcio no sistema desintegração lavoura pecuária. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, n. 1, p. 875 882, 2011.

PAULETTI, V.; MOTTA, A. C. V. **Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná**. Paraná, 2017.

PEARSON K. **On lines and planes of closest fit to systems of points in space**. Philos Mag 1991.

PERALTA, N. R.; COSTA, J. L.; FRANCO, M. C.; BALZARINI, M. Delimitación de zonas de manejo con modelos de elevación digital y profundidad de suelo. **Interciencia**, v. 38, n. 6, p. 418-424, 2013

PERALTA, N. R.; COSTA, J. L.; BALZARINI, M.; FRANCO, M. C.; CÓRDOBA, M.; BULLOCK, D. Delineation of management zones to improve nitrogen management of wheat. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 110, p. 103-113, 2015.

PETTER, F. A.; ANDRADE, F. R.; ZUFFO, A. M. MONTEIRO, M. M. S. ; PACHECO, L. P.; ALMEIDA, F. A. Doses e épocas de aplicação de potássio no desempenho agrônomo do milho no cerrado piauiense. Revista. **Comunicata Scientiae**, p. 372-382, 2016.

PRADO R. M. **Nutrição de plantas**. São Paulo: Editora UNESP, 407p., 2008.

PIERCE, F. J., ROBERT, P. C. AND MANGOLD, G. Site-specific management: The pros, the cons, and the realities. In **Proceedings of the International Crop Management Conference, Iowa State University**, Iowa State Univ. Press, Ames. p. 17-21, 1994.

RAMOS, F. T.; SANTOS, R. T.; CAMPELO JUNIOR, J. H.; MAIA, J. C. S. Defining management zones based on soil attributes and soybean productivity. **Revista Caatinga**, v. 30, n. 2, p. 427-436, 2017.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas: IAC, 2001.

RAIJ, B. VAN. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute. p. 195-217, 2011.

RAVEN, P. H.; EVERT, R. F.; EICHHORN, S. E. **Biologia Vegetal**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, p. 646-675, 2001.

REICH, R. M. **Spatial Statistical modeling of natural resources**. Colorado State University: Fort Collins, 2008.

RESENDE, A. V.; FURTINI NETO, A. E.; ALVES, V. M. C.; MUNIZ, J. A.; CURI, N.; FAQUIN, V.; KIMPORA, D. I.; SANTOS, J. Z. L.; CARNEIRO, L. F. Fontes e modos de aplicação de fósforo para o milho em solo cultivado da Região do cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 453-466, 2006.

SOBJAK, R. **incorporation of computational modules as microservices in the agdatabox platform and development of the agdatabox-map application**. 2021. 250f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2021.

ROBERTS, R. K., B. C. ENGLISH; J. A. LARSON. **Factors affecting the location of precision farming technology adoption** in Tennessee. 2002. J. Ext. 40. <https://www.joe.org/joe/2002february/rb3.php> (accessed on Nov., 15th, 2018)

RODRIGUES, A. C.; ANTUNES, J. E. L.; MEDEIROS, V. V.; BARROS, B. G. F.; FIGUEIREDO, M. V. B. Resposta da co-inoculação de bactérias promotoras de

crescimento em plantas e *Bradyrhizobium* sp. em caupi, **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 28, sup. 1, p. 196-202, Mar. 2012.

RODRIGUES, F. A.; VIEIRA, L. B.; QUEIROZ, D. M.; SANTOS, N. T. Geração de zonas de manejo para cafeicultura empregando-se sensor SPAD e análise foliar. São Paulo: **UNICAMP**, 2011.

ROSA, R. P.; PITTELKOW, F. K.; PASQUALLI, R. M. Doses e métodos de aplicação de fósforo na cultura da soja. Fundação de Apoio à Pesquisa e Desenvolvimento Integrado Rio Verde. Safra 2014-14, resultados de pesquisa – divulgação aberta. Lucas do Rio Verde: Fundação Rio Verde, 9p. **Boletim Técnico**, n. 08, 2015.

ROSEGRANT, M. W.; KOO, J.; CENACCHI, N.; RINGLER, C.; ROBERTSON, R.; FISHER, M.; COX, C.; GARRETT, K.; PEREZ, N. D.; SABBAGH, P. **Food security in a world of natural resource scarcity: the role of agricultural technologies**. Washington, DC: IFPRI, 2014, 154p.

ROSOLEM, C. A. **Nutrição mineral e adubação da soja**. 2ª ed., Piracicaba, SP: Instituto da Potassa e Fosfato: Instituto Internacional da Potassa e Fosfato, 1982. 80p. (Boletim técnico 6).

ROTILI, E. A.; FIDELIS, R. R.; SANTOS, M. M.; BARROS, H. B.; PINTO, L. C. Eficiência do uso e resposta à aplicação de fósforo de cultivares de arroz em solos de terras altas. **Bragantia**, Campinas, p. 705-710, 2010.

ROTILI, E. A.; FIDELIS, R. R.; DOS SANTOS, M. M.; DE CASTRO NETO, M. D.; KICHEL, E.; CANCELLIER, E. L. Eficiência no uso de fósforo de variedades de arroz cultivadas em solos de várzea irrigada. **Ceres**, 2015.

SADOSKY, M. Cálculo numérico e gráfico; tradução de João Luís Escosteguy Merino. **Interciência**. Rio de Janeiro, 1980, 306p.

SANTI, A. L.; AMADO, T. J. C.; CHERUBIN, M. R.; MARTIN, T. N.; PIRES, J. L.; FLORA, L. P. D.; BASSO, C. J. Análise de componentes principais de atributos químicos e físicos do solo limitantes à produtividade de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 9, p. 1346-1357, 2012.

SANTI, A. L.; GIOTTO, E.; SEBEM, E.; AMADO, T. J. C. Agricultura de Precisão no Rio Grande do Sul, **CESPOL**, 2016.

SCHENATTO, K. **Utilização de métodos de interpolação e agrupamento para definição de unidades de manejo em agricultura de precisão**. 2014. 101f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2014.

SCHENATTO, K.; SOUZA, E. G.; BAZZI, C.L.;BIER, V. A.; BETZEK, N. M.; GAVIOLI, A. Data interpolation in the definition of management zones. **Acta Scientiarum**, p. 31-40, 2016.

SCHENATTO, K.; SOUZA, E. G.; BAZZI, C. L.; BETZEK, N. M.; GAVIOLI, A.; BENEDEZZI, H. M. Use of the farmer's experience variable in the generation of management zones. Semina: **Ciências Agrárias**, v. 38, n. 4, p. 2305-2321, 2017a.

SCHENATTO, K.; SOUZA, E. G.; BAZZI, C. L.; GAVIOLI, A.; BETZEK, N. M.; BENEDEZZI, H. B. Normalization of data for delineating management zones. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 143, n. 1, p. 238-248, 2017b.

SCHENATTO, K. **Manual de procedimentos para amostragem e análise de solo** – laboratório de mecanização e agricultura de precisão (LAMAP). Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, 2016.

SCHIAVINATTI, A. F.; ANDREOTTI, M.; BENETT, C. G. S.; PARIZ, C. M.; LODO, B. N.; BUZZETTI, S. Influência de fontes e modos de aplicação de nitrogênio nos componentes da produção e produtividade do milho irrigado no cerrado. **Bragantia**, Campinas, v. 70, n. 4, p. 925-930, 2011.

SCHLINDWEIN, J. A.; BORTOLON, L.; GIANELLO, C. Calibração de métodos de extração de potássio em solos cultivados sob sistema de plantio direto.

SCHIMMELPFENNIG, EBEL, D; Sequential Adoption and Cost Savings from Precision Agriculture. **Journal of Agricultural and Resource Economics**, p. 97-11???, 2016.

SEDIYAMA, T. Produtividade da soja. Ed. 1, Mecenas, Londrina. 2016, 310 p.

SFREDO, G. J.; BORKERT, C. M. **Deficiências e Toxicidades de Nutrientes em Plantas de soja**. Embrapa, documento 231, 2004.

SERAFIM, E. M.; ONO; B. F.; ZEVIANI, M. W; NOVELINO, O. J.; SILVA, V. J. Umidade do solo e doses de potássio na cultura da soja.. **Rev. Ciênc. Agron.**, v. 43, n. 2, Fortaleza, Abr./Jun., 2012.

SFREDO, G. J. **Soja no Brasil**: calagem, adubação e nutrição mineral. Londrina, 2008, 147p.

SILVA, A. F.; SCHONINGER, E. L.; CAIONE, G.; KUFFEL, C.; CARVALHO, M. A. C. Produtividade de híbridos de milho em função do espaçamento e da população de plantas em sistema de plantio convencional. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 13, n. 2, p. 162-173, 2014.

SILVA, S. de A.; LIMA, J. S. de 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**, v. 34, p.15-22, 2010.

SOARES FILHO, R.; CUNHA, J. P. A. R. Agricultura de precisão: particularidades de sua adoção no Sudoeste de Goiás – Brasil. **Engenharia Agrícola**, v. 35, n. 4, p. 689-698, 2015.

SOBJAK, R.; SOUZA, E. G.; BAZZI, C. L.; URIBE-OPAZO, M. A.; BETZEK, N. M. Redundant variables and the quality of management zones. **Engenharia Agrícola**, v. 36, n. 1, p. 78-93, 2016.

SORATTO, R. P.; PEREIRA, M.; COSTA, T. A. M; LAMPERT, V. N. Fontes alternativas e doses de nitrogênio no milho safrinha em sucessão à soja. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 41, n. 4, p. 511-518, 2010.

SOUZA, E. G.; SCHENATTO, K.; BAZZI, C. L. Creating thematic maps and management zones for agriculture fields. In: International Conference on Precision Agriculture, 14^a ed., 2018, Montreal. **Anais [...]** Montreal: ICPA Press, 2018. 1 CD-ROM.

SOUZA, E. G.; SOBJAK, R.; BAZZI, C. L. **Plataforma web AgDataBox de integração de dados, softwares, procedimentos e metodologias para Agricultura Digital**. Cascavel, 2018.

SULECKI, J. C. Association seeks definitive definition of “precision agriculture”— What’s your vote? **International Society of Precision Agriculture (ISPA)**. <https://www.precisionag.com/events/association-seeks-definitive-definition-of-precision-agriculture-whats-your-vote/>, 2018.

SUSZEK, G.; SOUZA, E. G.; URIBE-OPAZO, M. A.; NOBREGA, L. H. P. Determination of management zones from normalized and standardized equivalent productivity maps in the soybean culture. **Eng. Agríc.**, v. 31, n. 5, p. 895-905, 2011.

STARK, P. **Introdução aos métodos numéricos; tradução de João Bosco Pitombeira de Carvalho**. Ed. Interciência, Rio de Janeiro, 1979, 426p.

TAYLOR, J. E.; WHELAN, BRETT. **Australian Centre for Precision Agriculture**, 2010. http://www.agriprecisione.it/wpcontent/uploads/2010/11/general_introductionto_precision_agriculture.pdf.

TAYLOR, J. A.; MCBRATNEY, A. B.; WHELAN, B. M. Establishing management classes for broadacre agricultural production. **Agron. J.** p. 1366-1376, 2007.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6ª ed. Porto Alegre: Artmed, 2017, 719p.

TAIZ L, ZEIGER E. **Fisiologia vegetal**. 5ª ed. Porto Alegre: Artmed, 2013, 918p.

TAGARAKIS, A.; LIAKOS, V.; FOUNTAS, S.; KOUNDOURAS, S.; GEMTOS, T. A. Management zones delineation using fuzzy clustering techniques in grapevines. **Precision Agriculture**, p. 18-39, 2013.

TAKASU, A. T.; RODRIGUES, R. A. F.; GOES, R. J.; HAGA, K. I.; ARF, O.; GITTI, D. C. Características agronômicas da cultura do milho em função do preparo de solo e arranjo espacial de plantas. **Agrarian**, v. 7, n. 26, p. 485-495, 2014.

TEIXEIRA, M. B. dos R.; SCALON, J. D. Comparação entre estimadores de semivariância. **Rev. Bras. Biom.**, São Paulo, v. 31, n. 2, p. 248-269, 2013.

THOMPSON, N., C. BIR, D. WIDMAR; MINTERT, J., 2018. Farmer perceptions of precision agriculture benefits. **J. Agric. Appl. Econ.** p. 142-163, doi:10.1017/aae.2018.27.

TORRES, F. E.; SOUZA, L. C. F.; ANDRADE, L. H. L.; PEDROSO, F.; MATOSO, A. O.; TORRES, L. D.; BENETT, C. G. S.; BENETT, K. S. S. Influência da cobertura do solo e doses de nitrogênio na cultura do milho safrinha. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 9, n. 1, p. 36-41, 2014.

TRIGOLO, A. L. M.; QUAREZEMIN, M. A. K.; GERMANO, M. G.; CASTRO, C.; OLIVEIRA JUNIOR, A. Contribuição do potássio não trocável para a produtividade de soja e milho safrinha. **EMBRAPA**. p. 35-43, 2015.

UEHARA, G.; GILLMAN, G. P. **The mineralogy, chemistry and physics of tropical soils with variable charge**. Boulder: Westview Press, Inc., 1981, 188p.

VALANDAO, JUNIOR.; BERGAMIN, A. C.; VENTUROSOS, L. R.; SCHLINDWEIN, J. A.; CARON, B. O.; SCHMIDT, D. Adubação fosfatada na cultura da soja em Rondônia. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 9, n. 3, p. 369-375, 2008.

VALDERRAMA, M.; BUZETTI, S.; BENETT, C. G. S.; ANDREOTTI, M.; TEIXEIRA

FILHO, M. C. M. Fontes e doses de NPK em milho irrigado sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 2, p. 254-263, 2011.

VAN STRAATEN, P. *Agrogeology – The use of Rocks for Crops*. Universidade de Guelph/P. 2007, 440p.

VIEIRA, R. F. Ciclo do nitrogênio em sistemas agrícolas. **EMBRAPA**, Brasília, 2017, 163p.

XIANG, L.; YU-CHUN, P.; ZHONG-QIANG G.; CHUN-JIANG, Z. Delineation and scale effect of precision agriculture management zones using yield monitor data over four years. **Agricultura Sciences in China**, v. 6, n. 2, p.180-188, 2007.

XU, R.; WUNSCH, D. Survey of clustering algorithms. **IEEE Transactions on Neural Networks**, v. 16, n. 3, p. 645-678, 2005.

XIN-ZHONG, W.; GUO-SHUN, L.; HONG-CHAO, H.; ZHEN-HAI, W.; QING-HUA, L.; XUFENG, L.; WI-HONG, H.; YAN-TAO, L. Determination of management zones for a tobacco Field based on soil fertility. **Computers and electronics in agriculture**, Amsterdam, v. 65, p. 168-175, 2009.

YAMADA T. **Resistência de plantas às pragas e doenças: pode ser afetada pelo manejo da cultura**. Piracicaba: Informações Agronômicas Potafós, 24 p. (Documentos, 108), 2004.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. 1ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013, 215p.

YAO, R. J.; YANG, J. S.; ZHANG, T. J.; GAO, P.; WANG, X. P.; HONG, L. Z.; WANG, M. W. Determination of site-specific management zones using soil physical-chemical properties and crop yields in coastal reclaimed farmland. **Geoderma**, v. 232-234, p. 381-393, 2014.

ZAMBIAZZI, E.V. et al. Desempenho agronômico e qualidade sanitária de sementes de soja em resposta à adubação potássica. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 40, n. 3, p. 543-553, 2017.

ZHANG, X.; SHI, L.; JIA, X.; SEIELSTAD, G.; HELGASON, C. Zone mapping application for precision-farming: a decision support tool for variable rate application. **Precision Agriculture**, v. 11, n. 2, p. 103-114, 2010.

ZHANG, Q., LU, J., WEI, H., ZHANG, M., DUAN, H., “Dynamic hand gesture segmentation method based on unequalprobabilities background difference and improved FCM Algorithm”, In: **International Journal of Innovative Computing, Information and Control**, 2015.

ZHAO, G.; MIAO, Y.; WANG, H.; SU, M.; FAN, M; ZHANG, F.; JIANG, R.; ZHANG, Z.; LIU, C.; LIU, P.; MA, D. A preliminary precision rice management system for increasing both grain yield and nitrogen use efficiency. **Field Crops Research**, p. 23-30, 2013.

ZHOU, X., B. C.; ENGLISH, J. A.; LARSON, D. M.; LAMBERT, R. K.; ROBERTS, C. N.; Boyer, M. Velandia, et al. Precision farming adoption trends in the Southern U.S. **J. Cotton Sci**. p. 143-155, 2017. <https://www.cotton.org/journal/2017-21/2/upload/JCS21-143.pdf>.