Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

**População variada de híbridos de milho: uma estratégia de gestão
das variabilidades espacial e temporal das lavouras**

Adriano Adelcino Anselmi

Tese apresentada para obtenção do
título de Doutor em Ciências. Área de
concentração: Fitotecnia

**Piracicaba
2016**

Adriano Adelcino Anselmi
Bacharel em Agronomia

**População variada de híbridos de milho: uma estratégia de gestão
das variabilidades espacial e temporal das lavouras**

Orientador:
Prof. Dr. **JOSÉ PAULO MOLIN**

Tese apresentada para obtenção do
título de Doutor em Ciências. Área de
concentração: Fitotecnia

**Piracicaba
2016**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP**

Anselmi, Adriano Adelcino

População variada de híbridos de milho: uma estratégia de gestão das variabilidades espacial e temporal das lavouras /Adriano Adelcino Anselmi. - - Piracicaba, 2016.
97 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Zonas de manejo 2. Densidade de plantas 3. Milho 4. Semeadura em taxas variáveis I. Título

CDD 633.15
A618p

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

Antes de tudo, sou grato ao meu Deus em Cristo Jesus.

Dedico este trabalho aos meus pais Eloi José Anselmi e Irene Bissoloti Anselmi. A vocês devo todo meu amor, carinho, gratidão e admiração. Serão meus professores, eternamente!

AGRADECIMENTOS

Agradeço a *Deus* pela família que tenho! Obrigado *pai e mãe*, por tudo que fizeram por mim e, especialmente, por proporcionarem a oportunidade de cursar o doutorado.

Ao Meu irmão *Rafael Anselmi* pelo seu apoio, companheirismo e amizade.

Agradeço a cada oração e a cada palavra de apoio que recebi. Uma ligação, uma conversa, por mais breve que tenha sido, confortou e trouxe ânimo para concluir essa etapa.

À minha afilhada *Isabela* que, mesmo sem saber, na inocência de uma criança me faz relembrar a simplicidade da vida.

Ao longo da vivência no ambiente da universidade e das experiências ali adquiridas não aprendi da ciência os ensinamentos mais fascinantes, mas de cada pessoa com quem deparei.

Ao Professor e amigo *Dr. José Paulo Molin*, por quem tenho muito respeito e admiração. Obrigado por seus ensinamentos, pela paciência, confiança e pelas oportunidades proporcionadas ao longo do curso.

Ao Professor *Dr. Raj Khosla* pelo suporte e pela confiança durante o período de “sanduíche” na Colorado State University (CSU).

Aos colegas e amigos que formei. Aprendi muito com vocês, *Matheus (Tchê)*, *André (Napa)*, *Rodrigo (Bin)*, *Natanael (Bahia)*, *Marcos (Gollun)*, *Mark (Panceta)* e *Fábio (Nêne)*. Obrigado pela ajuda em cada etapa desta Tese e pela parceria a todo tempo.

Ao *Chicão*, pela amizade e pelo suporte nas atividades de campo.

Aos produtores rurais, sem os quais não teria sido possível realizar este trabalho. Obrigado *Élvio Rodrigues*, *Lúcio Miranda*, *Alisson Fornari* e *Sebastian Spekken*.

Ao *Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)* e à *MONSANTO* pelo auxílio financeiro.

À *Universidade de São Paulo (USP)* e à *Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiros” (ESALQ)* por meio do *Programa de Pós-graduação em Fitotecnia*, pela oportunidade de cursar o Doutorado.

SUMÁRIO

RESUMO.....	9
ABSTRACT.....	11
LISTA DE FIGURAS	13
LISTA DE TABELAS	17
1 INTRODUÇÃO.....	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1 Agricultura de precisão	23
2.2 Recursos de AP.....	24
2.2.1 Condutividade elétrica do solo	24
2.2.2 Mapeamento da produtividade	25
2.2.3 Delimitação de unidades de gestão diferenciada e técnicas de agrupamento.....	27
2.3 A cultura do Milho (<i>Zea mays</i>).....	29
2.4 Determinantes da variabilidade na produção de grãos de milho	30
2.4.1 Fatores bióticos da cultura do milho relacionados à população de plantas	30
2.4.2 Fatores de solo	32
2.5 População de plantas.....	33
2.6 Semeadura em taxas variáveis	35
3 METODOLOGIA.....	37
3.1 Caracterização do ambiente de estudo	37
3.2 Delimitação das Unidades de Gestão Diferenciada (UGD).....	38
3.3 Experimentos em faixas.....	42
3.4 Análises estatísticas	45
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	47
4.1 Delimitação das unidades de gestão diferenciadas	47
4.2 Caracterização dos experimentos em faixas e ambientes de estudo	61
4.3 Distribuição de plantas	66
4.4 Resposta das UGD à variação de população de plantas na região Centro-Oeste	72
4.5 Resposta das UGD à variação de população de plantas na região Sul	75
4.6 Resposta dos híbridos à população e ao ambiente (UGD)	79
4.7 Rentabilidade da gestão de população de plantas em UGD	86
5 CONCLUSÕES	89
REFERÊNCIAS	91

RESUMO

População variada de híbridos de milho: uma estratégia de gestão das variabilidades espacial e temporal das lavouras

A população de plantas é um dos fatores que impacta fortemente na produtividade da cultura do milho (*Zea mays*); justá-la localmente é uma das estratégias para gerenciar a variabilidade das lavouras e otimizar o uso de recursos do ambiente que não estão sob o controle do produtor rural, como o tipo de solo e a capacidade de retenção de água. O objetivo desse estudo foi investigar a produtividade de híbridos de milho submetidos à semeadura em taxas variáveis (STV) em unidades de gestão diferenciada (UGD). Foi utilizado o total de dez híbridos de milho testados em cinco níveis de populações de plantas a partir da população regularmente recomendada (60%, 80%, 100%, 120% e 140%). Foram conduzidos cinco experimentos em talhões comerciais entre os anos de 2012 e 2015, no Brasil, na região Centro-Oeste (Maracajú –MS), durante a segunda safra de verão (safrinha) e na região Sul (Piraí do Sul – PR), durante a safra de verão. A pesquisa foi dividida em duas etapas principais: (1) delimitação das UGD e (2) implantação dos experimentos em faixas variando híbridos e população de plantas ao longo das UGD. Foram utilizados mapas históricos de produtividade (MP), mapa de condutividade elétrica do solo (CE) e mapa de altitude como atributos que deram origem às UGD. Dois métodos distintos de agrupamentos foram analisados: o método de “cluster” por “K-means” e o método pela média normalizada. As análises das UGD foram realizadas com base na estatística descritiva. Os experimentos em faixas tiveram os dados de produtividade referentes aos híbridos, população e UGD submetidos às análises de variância pelo F-teste e ANOVA e análise de regressão em função dos níveis de população de plantas por área. Foi possível discriminar, através das UGD, diferentes níveis de produtividade, CE do solo e concentração de nutrientes (CE, pH, CTC Efetiva, Argila, Areia, V%, M.O, e K), indicando que os procedimentos utilizados nesse estudo para a definição de UGD foram eficientes. O método de formação de UGD pela média normalizada proporcionou maior homogeneidade interna das UGD comparativamente ao método de “Cluster K-means”. A qualidade da distribuição longitudinal medida pelo espaçamento entre plantas (indicador da efetividade dos níveis de população) variou de 81% a 90% de espaçamentos aceitáveis entre os locais avaliados. A análise de variância foi significativa ($P < 0,05$) para interação tripla entre híbridos, população de plantas e UGD assim com as regressões foram significativas e os melhores modelos tiveram ajuste quadrático para população e produtividade na área da região Centro-Oeste – MS. Nas áreas da região Sul os experimentos não foram significativos. A população de plantas ótima pode diferir em até 5743 pl ha⁻¹ entre as diferentes UGD dentro de um mesmo talhão. Quanto menor a média de produtividade do talhão, mais restritiva é a faixa de população ótima. No entanto, não há uma recomendação simples a respeito da população de plantas ótima para cada UGD.

Palavras-chave: Zonas de manejo; Unidades de gestão diferenciada; População de plantas; Produtividade de milho; Semeadura em taxas variáveis; Variabilidade espacial

ABSTRACT

Corn plant population: a strategy to manage spatial and temporal field variability

Plant population per unit area is one of the most important aspects under the farmer's control that can influence maize grain yield. As the availability of resources for the growth of plants (like water availability and soil attributes) are not uniform along the fields, and considering the unfeasibility to change the environment setting, plant population per area is a key aspect under the farmer's control to optimize the use of these resources. This study aims to carry a comprehensive study of the strategy of variable rate seeding (VRS) within zones of distinct resource availability (management zones - MZ). A seasonal experimental design was set consisting in selecting ten different hybrids and five ranks of plant populations starting with a local recommended seeding rate and offsetting it in 40% and 20% below and above this reference. Five field experiments were conducted in commercial fields from 2012 to 2015 in two regions with distinct growing seasons in Brazil. In the Midwest region (Maracaju – MS) where corn is grown as a secondary crop following soybean within one season, and in the Southern region (Pirai do Sul – PR) where corn is grown as primary crop during the summer season; both under rain fed and no-tillage system. This research was split into two main stages: (1) definition of management zones (MZ) within agricultural fields and (2) implementation of strip tests varying hybrids and plant populations across MZ. The attributes used to delineate MZ were soil electrical conductivity (EC), yield maps (YM) and elevation. Two methods were analyzed to delineate MZ: cluster K-means and standardized average. MZ were analyzed by descriptive statistics. On the experimental data gathered from each season-experiment, yield of the hybrids, plant density and MZ were submitted to analysis of variance by F-test, ANOVA and regression analysis. MZ were able to differentiate levels of yield, and soil properties (EC, pH, Effective CTC, clay, sand, V%, MO, and K), suggesting that the procedures to define MZ used in this study were efficient. The standardized average provides greater internal homogeneity of MZ compared with the Cluster K-means. The quality of regular spacing between plants (indicator of seed rate quality) was 90% to 81% at all locations. The analyses of variance were significant ($P < 0.05$) for triple interaction between hybrids, plant population, and for the MZ at the Midwest region. For fields studied in the South the tests were not significant. The optimal plant population at the Midwest region can vary by up to 5743 pl ha⁻¹ across MZ within the same field. Lower yield averages have a narrow optimal plant population interval. However, there is no simple recommendation regarding the optimal plant population across MZ.

Keywords: Management zones (MZ); Plant population; Maize yield; Variable rate seeding (VRS); Spatial variability

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Conjunto sensor utilizado para coleta de dados de CE do solo. (a) conjunto utilizado em operação a campo; (b) computador de bordo	38
Figura 2 - Procedimentos de análise dos dados para definição das Unidades de Gestão Diferenciada (UGD).....	41
Figura 3 - Definição de UGD a partir do histórico de mapas de produtividade, CE e altitude	41
Figura 4 - Equipamentos utilizados para gerenciar e monitorar as taxas de semeadura	43
Figura 5 - Croqui de um dos experimentos em faixas mostrando a disposição das faixas ao longo da área experimental	44
Figura 6 - Acervo de mapas que compõem o banco de dados para delimitação das UGD da área estuda na região Centro-Oeste do Brasil (MS).....	47
Figura 7 - Distribuição dos dados de produtividade de milho 2009 e milho 2012 referentes à área de estudo na região Centro-Oeste do Brasil (MS)	48
Figura 8 - Distribuição dos dados CE do solo na profundidade entre 0 e 30 cm referente à área de estudo na região Centro-Oeste do Brasil (MS).....	49
Figura 9 - Mapa das UGD para o talhão de estudos em ambiente topical no Centro-Oeste do Brasil (MS).....	50
Figura 10 - Mapas de UGD resultante de diferentes métodos. (a) UGD delimitada com base no histórico de mapas normalizados; (b) Delimitação das UGD com base no método de agrupamentos “k-mean”; (c) Imagem de satélite da área de estudo obtida em estágio vegetativo (V8) da cultura do milho. Região Centro-Oeste do Brasil (MS).....	51
Figura 11 - Acervo de mapas que compõem o banco de dados para delimitação das UGD na região Sul do Brasil (PR). Área experimental utilizada no ano 2013	54
Figura 12 - Acervo de mapas que compõem o banco de dados para delimitação das UGD na região Sul do Brasil (PR). Área experimental utilizada no ano 2014	55
Figura 13 - Distribuição dos dados de produtividade de soja 2009; milho 2010; trigo 2010; soja 2011 e trigo 2011, referentes à área de estudo na região Sul do Brasil (PR), em 2013	57
Figura 14 - Distribuição dos dados de CE do solo na camada de profundidade de 0 a 30 cm referentes à área de estudo na região sul do Brasil (PR) estudada no ano de 2013	57
Figura 15 - Distribuição dos dados de produtividade de milho 2011 referente à área de estudo na região Sul do Brasil (PR) estudada no ano de 2014.....	58

- Figura 16 - Distribuição dos dados de CE do solo nas camadas de profundidade de 0 a 30 cm e 30 a 90 cm referentes à área de estudo na região Sul do Brasil (PR) estudada no ano de 2014..... 59
- Figura 17 - Mapas de UGD resultante de diferentes métodos. (a) UGD delimitada com base 60
- Figura 18 - Mapas de UGD resultante de diferentes métodos. (a) UGD delimitada com base no histórico de mapas normalizados; (b) delimitação das UGD com base no método de agrupamentos “k-mean”; (c) imagem de satélite do talhão de estudo. Região Sul do Brasil (PR). Área experimental utilizada no ano 2014. 60
- Figura 19 - Faixas de híbridos de milho cultivados ao longo das UGD em cinco níveis de população relativas à média usual na região Centro-Oeste (MS) para a segunda safra de verão (população usual = 55000 pl ha⁻¹). 62
- Figura 20 - Faixas de híbridos de milho cultivados ao longo das UGD em cinco níveis de população relativas à média usual na região Sul para a safra de verão (100% = 77000 pl ha⁻¹). 63
- Figura 21 - Precipitação pluvial mensal para os anos de 2013, 2014, 2015 e média dos últimos 20 anos para a região de Maracajú – MS. Fonte: INMET, 2015..... 64
- Figura 22 - Precipitação pluvial mensal para os anos agrícolas 2012/2013, 2013/2014 e média dos últimos 20 anos para a região de Piraí do Sul – PR. Fonte: INMET, 2016 65
- Figura 23 - Visão parcial do campo experimental no momento da colheita (a) quebramento de..... 65
- Figura 24 - Frequência de espaçamento longitudinal entre plantas de milho para os diferentes níveis de população relativa (60%, 80%, 100%, 120% e 140% da média praticada na região) no ano 2013. Região Centro-Oeste – MS..... 66
- Figura 25 - Frequência de espaçamento longitudinal entre plantas de milho para os diferentes níveis de população relativa (60%, 80%, 100%, 120% e 140% da média praticada na região) no ano 2014. Região Centro-Oeste – MS..... 67
- Figura 26 - Frequência de espaçamento longitudinal entre plantas de milho para os diferentes níveis de população relativa (60%, 80%, 100%, 120% e 140% da média praticada na região) no ano 2015. Região Centro-Oeste – MS..... 67
- Figura 27- Percentual de falhas, plantas múltiplas, espaçamentos aceitáveis e coeficiente de variação (CV). Percentual médio para os três anos de experimentos (2013, 2014 e 2015). Número total de observações N=13730. Médias de sete híbridos e três repetições. Região Centro-Oeste – MS. 69
- Figura 28 - População de plantas atingida (média) por unidade de gestão diferenciada (UGD) nos anos de 2013, 2014 e 2015. Média de quatro híbridos e três repetições em 2013 e 2014, e três híbridos e três repetições em 2015. Região Centro-Oeste – MS. 71

- Figura 29 - População de plantas atingida (mediana) por nível de população relativa (60%, 72
- Figura 30 - Produtividade de milho nas unidades de gestão diferenciadas (UGD de alto desempenho; UGD de baixo desempenho) em cultivo de segunda safra de verão (safrinha de milho) no MS ao longo dos anos 2013, 2014 e 2015. Dados de quatro híbridos e três repetições em 2013 e 2014, e três híbridos e três repetições em 2015. Região Centro-Oeste – MS..... 73
- Figura 31- Efeito da população de plantas na produtividade de milho para as diferentes unidades de gestão (UGD de alto desempenho; UGD de baixo desempenho) em cultivo de segunda safra de verão (safrinha) no MS ao longo dos anos 2013, 2014 e 2015. Dados de quatro híbridos e três repetições em 2013 e 2014, e três híbridos e três repetições em 2015. Região Centro-Oeste – MS..... 74
- Figura 32 - Efeito da população de plantas na produtividade de milho sob colheita mecanizada comparativamente à produtividade estimada pela colheita manual. Região Sul (PR). Cada ponto de colheita manual representa a média de um híbrido (2 UGD x 3 repetições). Pontos de colheita mecanizada representam a média de diversos pontos coletados pelo sensor embarcado na colhedora (2 UGD x 3 repetições). As linhas sólidas representam a curva ajustada para o conjunto de pontos. 76
- Figura 33 - Produtividade de milho nas unidades de gestão diferenciadas (UGD de alto desempenho; UGD de transição e UGD de baixo desempenho) em cultivo de verão na região Sul do Brasil – PR. Ano agrícola 2013/2014..... 77
- Figura 34 - Efeito da população de plantas na produtividade de milho para as diferentes unidades de gestão (UGD de alto desempenho; UGD de transição) em cultivo de segunda de verão na região Sul – PR. Ano agrícola 2013/2014. 78
- Figura 35 - Efeito da população de plantas na produtividade de híbridos de milho em diferentes unidades de gestão (UGD de alto desempenho; UGD de baixo desempenho). Cultivo de segunda safra de verão (safrinha) na região Centro-Oeste – MS no ano 2013. 79
- Figura 36 - Efeito da população de plantas na produtividade de híbridos de milho em diferentes unidades de gestão (UGD de alto desempenho; UGD de baixo desempenho). Cultivo de segunda safra de verão (safrinha) na região Centro-Oeste – MS no ano 2014. 81
- Figura 37- Efeito da população de plantas na produtividade de híbridos de milho em diferentes unidades de gestão (UGD de alto desempenho; UGD de baixo desempenho). Cultivo de segunda safra de verão (safrinha) na região Centro-Oeste – MS no ano 2015. 82
- Figura 38 - Produtividade média dos híbridos de milho comparados dentro de cinco níveis de 83

- Figura 39 - Produtividade média dos híbridos de milho comparados dentro de cinco níveis de população de plantas por área (percentual de plantas em relação à média recomendada para a região) em diferentes unidades de gestão diferenciada (UGD de alto desempenho; UGD de baixo desempenho) no cultivo de segunda safra de verão (safrinha) no MS no ano de 2014. Médias seguidas de mesma letra (a, b, c, d) não diferem estatisticamente pelo teste de médias (LSD a 5% de significância) para híbridos dentro da combinação população e UGD. . Região Centro-Oeste – MS. 85
- Figura 40 - Efeito da população de plantas sob rendimento líquido para as diferentes unidades 86
- Figura 41 - Efeito da população de plantas sob o rendimento líquido em três cenários de custo 88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização dos híbridos de milho utilizados em cada ambiente.....	42
Tabela 2 - Populações de plantas desejada a partir da população regularmente recomendada nas regiões de estudo para primeira e segunda safras de verão.....	43
Tabela 3 - Análise descritiva dos valores de produtividade de milho 2009 e milho 2012 nas UGD obtidas por dois métodos diferentes, método da média normalizada e método de “cluster k-means”.....	52
Tabela 4 - Análise de variância dos atributos de solo, condutividade elétrica (CE), pH, alumínio (AL), capacidade de troca de cátions efetiva (CTC Efetiva), Argila, Areia, saturação de bases (V%), matéria orgânica (M.O.), potássio (K) e fósforo (P) na camada superficial do solo (0 – 20 cm) para as três diferentes UGD obtidas pelo método da média normalizada.	53
Tabela 5 - Matriz de correlação de mapas da área experimental estudada no ano de 2013 na região Sul do Brasil (PR).....	55
Tabela 6 - Matriz de correlação de mapas da área experimental estudada no ano de 2014 na região Sul do Brasil (PR).....	56
Tabela 7- Percentual de falhas, espaçamentos múltiplos, espaçamentos aceitáveis e coeficiente de variação (CV) dos espaçamentos para os cinco diferentes níveis de população testados nos anos de 2013, 2014 e 2015. Dados de quatro híbridos e três repetições em 2013 e 2014, e três híbridos e três repetições em 2015. Região Centro-Oeste – MS.	68

1 INTRODUÇÃO

Existe uma população de plantas ótima em que a produtividade das culturas é maximizada, considerando a especificidade de cada ambiente. Assim, as variabilidades espacial e temporal das lavouras sugerem que não existe uma população estanque cuja produtividade é otimizada na lavoura como um todo.

A Agricultura de Precisão (AP) vem contribuir para identificar a variabilidade das lavouras e possibilita gerenciar separadamente regiões com potenciais de desempenho distintos. Nesse sentido, a abordagem de Unidades de Gestão Diferenciada (UGD) preconiza caracterizar os ambientes de uma lavoura e agrupar regiões de características semelhantes. A partir da delimitação prévia das UGD é possível definir estratégias diferentes para cada parte da lavoura, considerando suas especificidades.

Uma possível estratégia de gestão da variabilidade espacial das lavouras é a utilização da aplicação de sementes em taxas variáveis (STV) para otimizar o uso de recursos do ambiente. Desta forma, adotar UGD e entender qual o desempenho das diferentes taxas de população de plantas em cada uma constitui alternativa para melhorar a produtividade das lavouras.

Alguns dos indicadores para caracterização dos ambientes de uma lavoura em UGD são mapas de produtividade (MP) de diferentes safras ao longo dos anos e mapas de sensoriamento de solo, como mapa de condutividade elétrica (CE), mapas de textura e mapa de relevo. Estes recursos podem auxiliar na identificação da variabilidade espacial de maneira rápida e eficiente, com baixo custo, e têm potencial para orientar critérios de recomendação do uso de taxas variáveis de sementes (SUDDUTH et al., 1998; GODWIN et al., 2003; SHANAHAN et al., 2004).

Tentativas de utilização de populações variadas de plantas de milho como estratégia para incrementar o rendimento da cultura têm sido realizadas de forma empírica entre os produtores rurais e passam a ser foco de estudos no meio científico. As dificuldades para recomendar as taxas variáveis de populações de plantas incidem, principalmente, na interação da população de plantas e dos genótipos com os ambientes. Nesse sentido, busca-se unir grande quantidade de dados coletados – muitos deles de forma automatizada – e estabelecer padrões para chegar a uma recomendação de população que tenha boa capacidade de predição dos resultados.

No contexto prático da operação de semeadura, a mecanização deixou de ser um limitante e possibilita variar o número de sementes em tempo real conforme recomendação prévia estabelecida de acordo com a necessidade de cada UGD. Isso se tornou acessível e prático a partir do emprego de sistemas eletrônicos controladores dos sistemas de dosagem e distribuição das semeadoras combinados com os Sistemas de Navegação Global por Satélite (GNSS), capazes de variar as doses de insumos em tempo real. Existem, portanto, recursos disponíveis aos produtores para que possam praticar a gestão das lavouras tendo como base as UGD.

Por outro lado, o melhoramento genético de plantas tem contribuído para a seleção de características que permitem tolerar estresses, a exemplo do incremento no número de plantas por área, o que tem sido um dos principais motivos dos aumentos em produtividade de milho (*Zea mays*) obtidos nos últimos anos. São reportados incrementos de 250% na população de plantas desde a década de 1930, com ganhos de produtividade superiores a 70 kg ha⁻¹ ao ano. Tal fato faz da população de plantas um dos fatores com grande potencial de impactar na produtividade (DUVIK, 1997). Ao mesmo tempo em que os híbridos modernos são mais exigentes em população de plantas (SANGOI et al., 2002), o aumento dos custos com sementes se torna um estímulo aos produtores para ajustarem as quantidades de sementes em função da variabilidade das lavouras, visando otimizar a produção e reduzir custos com sementes.

Independente dos avanços na mecanização e na genética de plantas, as variabilidades espacial e temporal permanecem como fatores determinantes para a gestão em UGD, ou seja, a variabilidade entre ambientes é pré-requisito para o sucesso da gestão diferenciada das lavouras com base em práticas de AP. Dos fatores responsáveis pela variabilidade das lavouras, poucos são passíveis de serem gerenciados pelo produtor, de serem diagnosticados, quantificados e tratados de forma precisa e específica para cada local dentro da área de cultivo. Nos casos dos fatores que não podem ser facilmente modificados é necessário gerenciá-los, não com vistas a homogeneizar a lavoura mas, segundo Molin (2003), para conviver usufruindo da variabilidade de forma a otimizar os insumos e os recursos ambientais para alcançar melhores rendimentos produtivos.

Desta forma, a hipótese estabelecida é de incrementar a população de plantas em áreas de um talhão definidas como de alto potencial de desempenho buscando beneficiar a cultura do milho com condições ambientais favoráveis presentes nesses locais. Complementarmente, sugere-se reduzir a população de plantas em áreas de baixo potencial de desempenho visando minimizar riscos de perdas de produtividade. A hipótese geral que norteia esta pesquisa,

portanto, é a de que é possível incrementar produtividade nas áreas de alto potencial de desempenho e reduzir custos com sementes nas áreas de baixo potencial de desempenho, ajustando as populações de plantas localmente.

Nesse sentido, esta pesquisa visa investigar a produtividade de híbridos de milho submetidos à semeadura em taxas variáveis como uma estratégia para a gestão das variabilidades espacial e temporal das lavouras. Para tanto, foram utilizados talhões comerciais e delimitadas as unidades de gestão diferenciada (UGD), regiões do talhão que apresentaram características semelhantes em escalas espacial e temporal, e na sequência foram avaliadas as produtividades de milho em função da população de plantas, dos genótipos e das UGD.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Agricultura de precisão

Avanços recentes em tecnologias de informação têm permitido aos agricultores registrarem grande quantidade de dados georreferenciados, com o objetivo de reduzir a incerteza na tomada de decisões (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1997; BLACKMORE, 2000).

O termo Agricultura de Precisão (AP), do inglês *Precision Agriculture*, foi utilizado para definir o sistema que veio resgatar a capacidade de conhecer cada pequena porção da lavoura, detalhes que haviam sido perdidos à medida que as áreas cultivadas foram crescendo. Essa gestão localizada só pôde ser operacionalizada em grande escala graças à incorporação do Sistema de Posicionamento Global (GPS) à agricultura, por volta de 1990. Esse foi, sem dúvida, o maior impulso para a difusão da AP (MOLIN, 2011).

A AP constitui-se como um conjunto de ferramentas aplicadas à agricultura que possibilitam fazer a gestão da produção agrícola contemplando as variabilidades espaciais e temporais das lavouras com o propósito de incrementar a produção, melhorar o retorno econômico e reduzir os impactos ambientais (SWINTON; LOWENBERG-DeBOER, 1998; MOLIN, 2001; BLACKMORE et al., 2003).

O surgimento da AP se deu na Europa e EUA com a confecção dos primeiros mapas de produtividade (MP) e aplicação de insumos em taxas variáveis (ATV), porém a velocidade com que vem sendo adotada é mais lenta do que se previa (SWINTON; LOWENBERG-DeBOER, 1998; McBRATNEY et al., 2005). No entanto, admite-se que o ritmo de adoção é condizente com um sistema complexo que envolve um conjunto de práticas e requer interação de algumas ferramentas para obtenção de um resultado efetivo, o que dificulta a comprovação de suas vantagens e, conseqüentemente, retarda a adoção pela maioria dos produtores (ANSELM, 2012). No Brasil, a adoção comercial da AP iniciou por volta do ano 1998 (MOLIN, 2011).

Diferentemente do que ocorreu nos países precursores em AP que adotaram, inicialmente, o mapeamento de produtividade e a aplicação de insumos em taxas variáveis (LOWENBERG-DeBOER, 1998; MOLIN, 2011), no Brasil o mapeamento de produtividade ainda é pouco adotado, apesar de mostrar a variabilidade espacial da produção e esta ser uma

importante informação para a tomada de decisão (MOLIN, 2011). Destaca-se, nesse sentido, que a maioria dos usuários de AP que cultivam grãos tem a intenção de adotar o mapeamento de produtividade e a semeadura em taxas variáveis nos próximos anos (ANSELM, 2012).

A AP tem conotação de “estratégia de gestão holística” (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1997) e requer conhecimento multidisciplinar para o emprego adequado das ferramentas envolvidas. Dentre os seus benefícios destaca-se a potencialidade de contribuir significativamente para reduzir os *footprints* ou as “pegadas ambientais” dos sistemas de produção agrícola, além de ser economicamente viável (REETZ, 2010).

A partir desse cenário busca-se integrar diferentes ferramentas para melhorar o gerenciamento das variabilidades espacial e temporal presentes nas lavouras.

2.2 Recursos de AP

Ao longo do processo produtivo é possível aplicar diversos recursos de AP, de maneira que um deve complementar ao outro, sugerindo a formação de um sistema de cultivo ou um ciclo de AP. Tal ciclo engloba mapeamento da produtividade, mapeamento de atributos de solo, passa pela análise e interpretação de dados seguida, por sua vez, das recomendações, intervenções e monitoramento da lavoura, até chegar ao próximo mapa de colheita. Para viabilizar esse ciclo estão envolvidos Sistemas de Navegação Global por Satélites (GNSS), sensores, Sistemas de Informações Geográficas dedicados (SIGs) e máquinas inteligentes (MOLIN, 2001).

Recursos como mapas de produtividade (MP), mapas de condutividade elétrica do solo (CE), mapa de elevação do terreno, fotografias aéreas e imagens de satélites, podem ser eficientes para delimitar áreas de potencial produtivo distinto e assim orientar a gestão diferenciada de cada parte da lavoura (SCHEPERS et al., 2004).

2.2.1 Condutividade elétrica do solo

Mapear a condutividade elétrica do solo (CE) é o primeiro passo para automatizar a semeadura em taxas variáveis (GRIFFIN, 2010). Ao investigarem o potencial da aplicação do mapeamento da CE do solo para determinar a semeadura em taxas variáveis Ehsani et al. (2005) identificaram relações positivas entre CE, taxas de sementes e produtividade,

sugerindo que esses fatores podem ser utilizados satisfatoriamente para planejar a operação de semeadura em taxas variáveis.

A CE é utilizada na agricultura para identificar qualitativamente a variabilidade espacial de atributos de solo. Textura, umidade e teor de sal são os fatores chave que influenciam as medidas de CE (GRIFFIN, 2010; SUDDUTH et al., 1998). Destaca-se que a maior parte dos solos de clima temperado apresenta baixa concentração de sais, assim, a maior contribuição da CE está relacionada à umidade do solo e à sua textura, por conta da sua elevada influência na umidade (BREVIK; FENTON, 2002).

A medição da CE realizada em estações secas apresenta baixa eficiência em determinar produtividade e requer certo teor de água no solo devido às medidas de CE estarem altamente relacionadas ao teor de água no solo (SUN, 2011). A inconsistência dos dados de CE coletados durante períodos de seca se deve à influência predominante de outros fatores de solo, que não o teor de água, afetando a CE e a produtividade (EHSANI et al., 2005).

Em condições favoráveis, a relação entre CE e produtividade pode alcançar valores de $R^2 = 0,80$ (SUN, 2011). Em anos onde o clima favorece bons rendimentos de produtividade o incremento espacial na CE reflete no incremento em produtividade, ou seja, uma associação positiva entre esses fatores $R^2 = 0,89$.

Um dos motivos que favorece o uso do mapeamento da CE do solo para identificar a variabilidade espacial é a capacidade de coletar grande número de dados por área que apresentem boas correlações com propriedades do solo de interesse para fazer uma gestão localizada. Por outro lado, coletar dados em grade georreferenciada com densidade de pontos suficiente para encontrar dependência espacial entre os atributos é uma operação cara e demorada, o que inviabiliza a caracterização da variabilidade por esse método, na maioria dos casos (GODWIN et al., 2003; SUN, 2011).

2.2.2 Mapeamento da produtividade

Os mapas de produtividade (MP) carregam informações de um grande número de fatores que interferem no desenvolvimento da cultura e pode ser entendido como um bom parâmetro de comparação entre as produtividades obtidas em diferentes partes de talhão (KING et al., 2005). A análise dos MP é um dos métodos mais corretos para estimar a heterogeneidade das lavouras (TYLÉN et al. 1997), justamente por conter dados que refletem

a resposta da cultura frente a todas as variáveis que interferiram na produtividade em determinado ano e em determinada parte do talhão (KING *et al.*, 2005; TYLÉN *et al.* 1997).

O mapa de produtividade é obtido de um conjunto bastante denso de pontos onde cada ponto representa uma amostra do peso de grãos. Cada ponto representa uma pequena parte da lavoura cuja área amostral é obtida com base na largura da plataforma da colhedora e na distância que a máquina percorre entre uma amostra e outra. Dentre os dados coletados em cada amostra está o peso de grãos, umidade dos grãos, parâmetros de área (largura da plataforma e velocidade de deslocamento da máquina), bem como a posição geográfica do ponto. Essas informações são obtidas por sensores apropriados instalados na colhedora e chegam a ser registradas em intervalos de 1s (MOLIN, 2001).

Invariavelmente, os dados coletados para a geração de mapas de produtividade carregam valores errôneos sistemáticos que precisam ser removidos visando a correta interpretação das informações. Os erros mais comuns ocorrem no início e no final de cada passada devido ao tempo de retardo e enchimento da máquina colhedora (BLACKMORE; MOORE, 1999; MOLIN, 2001). Esses ruídos ou erros podem ser facilmente identificados e eliminados do conjunto de dados originais com a aplicação de métodos simples de triagem (BLACKMORE; MOORE, 1999; SPEKKEN *et al.* 2013).

Ao avaliar a acurácia dos sensores de produtividade disponíveis no mercado, Arslan e Colvin (2002) identificaram que o erro médio pode chegar a 3,4%, considerando uma velocidade constante da colhedora quando comparado aos valores obtidos em balanças comuns. A qualidade dos dados de produtividade coletados pelos sensores instalados nas colhedoras aumenta conforme aumenta o comprimento da faixa colhida e diminui com a oscilação na velocidade da operação de colheita (ARSLAN; COLVIN, 2002).

Embora os mapas de produtividade possam vir a ser inconsistentes de um ano para outro quanto à variabilidade observada, devido a erros mecânicos e a variações bióticas e abióticas atípicas, uma coleção de mapas de produtividade ao longo dos anos pode reduzir a influência desses erros e ser bastante eficiente no processo de identificação da variabilidade espacial e temporal na produtividade (GODWIN *et al.*, 2003). Outra abordagem sugere associar mapas de produtividade com mapas de atributos de solo para reduzir a influência de anos atípicos sobre os mapas de produtividade visando, assim, a definição de áreas homogêneas (GODWIN *et al.*, 2003; SHANAHAN *et al.* 2004; KING, *et al.*, 2005).

Mapas de produtividade apresentam associação positiva com CE, textura e capacidade de armazenamento de água. Nesse sentido, é possível estabelecer uma complementaridade dessas informações para identificar áreas homogêneas (KING *et al.*, 2005).

2.2.3 Delimitação de unidades de gestão diferenciada e técnicas de agrupamento

No contexto da agricultura de precisão, as unidades de gestão localizadas se referem às regiões de um talhão que apresentam característica semelhante. Quando identificadas essas regiões homogêneas, espera-se uma produtividade semelhante internamente às mesmas (SCHEPERS et al. 2004).

Devido ao tamanho das áreas cultivadas surge a necessidade de mensurar e espacializar as características das lavouras para determinar unidades de gestão de tamanhos menores em relação ao todo da lavoura (KHOSLA et al., 2008). Juntamente com os dados de produtividade (mapas de produtividade), as propriedades físicas e químicas do solo (mapas de solo) têm sido objeto principal de investigação para caracterizar a variabilidade das lavouras (KHOSLA et al., 2008).

Ao identificar as variáveis de solo que estão relacionadas com a variabilidade produtiva de determinada cultura é possível determinar áreas de alto, médio e baixo potencial produtivo e, assim, manejá-las individualmente com estratégias específicas para cada parte do talhão (ORTEGA; SANTIBANEZ, 2007). Nesse sentido, a aplicação localizada de insumos é possível de ser feita nas unidades de gerenciamento demarcadas previamente, devido às semelhanças de fatores limitantes da produtividade (FRIDGEN et al., 2000).

As abordagens para delimitar as UGD em um talhão podem variar. Ao longo das últimas duas décadas, os atributos físicos e químicos do solo têm sido utilizados como os principais fatores para delimitar as UGD e tratar da variabilidade espacial de solo e plantas. Para facilitar o processo de caracterização do ambiente, informações obtidas via sensores proximais e sensores remotos são cada vez mais utilizados devido à rapidez e agilidade na coleta e à alta densidade de dados assim coletados (KHOSLA et al., 2010). Nesse sentido, mapas de produtividade e mapas de CE do solo são considerados os mais viáveis economicamente para subsidiar dados para definição das UGD (KING et al., 2005).

Duas abordagens principais podem ser levadas em consideração para definir UGD: a abordagem que tem o foco nas plantas utiliza mapas históricos de produtividade; já a abordagem pautada no solo utiliza mapas de atributos do solo (textura, CE, capacidade de armazenamento de água). Essas duas abordagens, no entanto, frequentemente podem apresentar correlação fraca entre si (STAFORD et al., 1996).

Uma terceira abordagem combina os dois métodos anteriores à experiência adquirida do produtor para a definição de unidades de gestão homogêneas (KHOSLA et al., 2008). O

produtor seria capaz de apontar regiões do talhão que têm um comportamento padrão característico com tendência de alto ou baixo potencial produtivo. Este último aspecto se limita à caracterização qualitativa das partes do talhão. Os mesmos autores avaliaram dois métodos de delimitação de UGD e, apesar de produzirem resultados semelhantes, concluíram que o método que envolveu o conhecimento do produtor teve melhor desempenho e é menos complexo que o método que utilizou mapas de produtividade, imagens aéreas e atributos de solo (CTC, argila, silte, areia e matéria orgânica).

Definidos os atributos das camadas a serem utilizadas para delinear as UGD é preciso definir o método estatístico para agrupar regiões semelhantes e separar regiões distintas entre si. Molin (2002) propôs uma definição de UGD com base apenas em mapas sequenciais de produtividade normalizada atribuindo-se limites para a classificação da variação presente nos mapas. No método descrito por Molin (2002), a UGD que apresenta estabilidade produtiva ao longo dos anos acima da média geral dos mapas analisados, qual seja, produtividade média superior a 105%, pode ser definida como UGD de alta produtividade; para produtividade entre 95% e 105% da média, a UGD é de média produtividade e para produtividades menores que 95%, a UGD é definida como de baixa produtividade.

Seguindo a mesma lógica para definição de UGD na região leste do Colorado no EUA, KHOSLA, et al, (2008) estabeleceram como limites regiões com produtividade de milho inferior a 9000 kg ha^{-1} , produtividade entre 9000 kg ha^{-1} e 12000 kg ha^{-1} e regiões de produtividade superior a 12000 kg ha^{-1} visando estratificar a variabilidade.

Por outro lado, métodos de agrupamentos mais robustos vêm sendo empregados amplamente para caracterizar a variabilidade espacial das lavouras (KHOSLA et al., 2008; ORTEGA; SANTIBANEZ, 2007; KING, et al. 2005; SCHEPERS, et al., 2004; WIEBOLD, FRAISSE, 2004). A análise de agrupamentos ou “*cluster*” faz parte do arcabouço dos métodos estatísticos multivariados que são comumente utilizados em diversas pesquisas científicas, cujas finalidades são a redução de dados ou a simplificação estrutural, ordenação de dados e agrupamentos, bem como investigação da dependência entre variáveis (JOHNSON E WICHERN, 1998).

Na análise de agrupamento, a amostra em estudo é dividida em grupos por meio de medidas de similaridade, ou seja, os elementos que são mais similares, de acordo com as variáveis estudadas, são agrupadas em um mesmo grupo. Segundo Manly (2008), o propósito da análise de agrupamentos é utilizar os valores das variáveis para planejar um esquema para agrupar os objetos em classes, de modo que objetos similares estejam na mesma classe. É

necessário considerar medidas que descrevam a similaridade entre elementos amostrais de acordo com as características que neles foram medidas (MINGOTI, 2013).

2.3 A cultura do Milho (*Zea mays*)

O milho (*Zea mays*) é a cultura mais cultivada no mundo, sendo o Brasil o terceiro maior produtor de milho depois dos EUA e da China. 51.5% do milho produzido no mundo está nas Américas e a produção nacional em 2014 foi de 79.8 milhões de toneladas (FAO, 2014). Nos últimos anos vem ocorrendo uma migração do milho cultivado na primeira safra para a segunda safra de verão, a “safrinha”. O milho de segunda safra representa 66% da produção nacional de milho: há dez anos a segunda safra de milho representava apenas 14 % do total. Quanto à área ocupada, dos 15,3 milhões de hectares cultivados com milho, 9,6 milhões de hectares são destinados ao cultivo de segunda safra. 51.6% da área nacional de segunda safra está nos estados do MT e MS onde o cultivo de segunda safra é superior a 98% da área total cultivada com milho (CONAB, 2016).

A planta de milho é uma gramínea tropical, pertencente ao grupo de plantas C4, adaptada à alta intensidade luminosa e altamente produtiva, em detrimento de um elevado gasto energético. O cultivo do milho se dá em regiões situadas entre 58° de latitude Norte (Canadá) a 40° de latitude Sul (Argentina), sob diversas altitudes, desde abaixo do nível do mar (Região do Mar Cáspio) até regiões com altitude de 2500 m, nos Andes Peruanos. No entanto estabelecem-se como condições ideais para o desenvolvimento da cultura: temperatura do solo superior a 10°C e umidade próxima da capacidade de campo na época de semeadura; durante a fase de desenvolvimento requer temperatura do ar em torno de 25°C, boa disponibilidade de água no solo e abundância de luz; umidade do ar superior a 70%, na fase de floração e enchimento de grãos e períodos secos por ocasião da colheita (DOURADO-NETO; FANCELLI, 2004).

No cultivo do milho de primeira safra, a cultura é menos exposta a riscos climáticos como geadas e secas. Já o milho cultivado na segunda safra é definido como o milho de sequeiro, cultivado extemporaneamente, ou seja, fora da época ideal não dispondo, portanto, das melhores condições climáticas para o seu desenvolvimento. Na maioria dos casos, é cultivado após a cultura da soja precoce, compreendendo os estados do Paraná, São Paulo, Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e, mais recentemente, Minas Gerais (CRUZ et al., 2012).

2.4 Determinantes da variabilidade na produção de grãos de milho

A produtividade alcançada em lavouras comerciais ainda não expressa o potencial genético dos materiais lançados nos últimos anos, apesar do incremento gradativo das quantidades produzidas em campo (DOURADO-NETO; FANCELLI, 2004). Isso se deve à quantidade de fatores que afetam o crescimento e a produção (MALAVONTA, 2006). Além da diversidade de fatores, as variabilidades espacial e temporal destes também afetam a produtividade. Destaca-se que muitas das causas de variabilidade não são passíveis de modificações, portanto, requerem uma convivência adequada para se obter a mínima influência indesejável à cultura (MOLIN, 2003).

Os fatores com maior potencial de afetar o desenvolvimento e a produção podem ser divididos em físicos, químicos e biológicos. Os fatores físicos são, predominantemente, de difícil intervenção (textura do solo, armazenamento e disponibilidade de água); os fatores químicos são de fácil intervenção, porém apresentam algumas limitações; os biológicos são facilmente gerenciáveis (variedades, precocidade, população de plantas) (MALAVOLTA, 2006).

2.4.1 Fatores bióticos da cultura do milho relacionados à população de plantas

O milho é a gramínea mais sensível às variações na população de plantas e a determinação da população ótima é uma tarefa complexa. Para cada sistema de produção existe uma população que maximiza o rendimento de grãos (SANGOY, 2000).

Na região do Cinturão do Milho, nos EUA, principal zona de cultivo deste cereal no mundo, os últimos 70 anos foram marcados por incrementos lineares no rendimento de grãos (HAMMER et al., 2009). Os ganhos de produtividade dos híbridos modernos de milho se devem ao incremento da população ótima, ao invés da melhoria na produção individual das plantas (DUVICK, 1997; HAMER et al., 2009; TOKATLIDIS; KOUTROUBAS, 2004). No Brasil, os híbridos modernos têm como características a precocidade, menor estatura de planta, menos folhas, folhas mais eretas e menor tamanho do pendão, o que justifica a tolerância ao maior número de plantas por área (SANGOI et al., 2002).

O aumento da produtividade através do incremento da população de plantas, em híbridos modernos, é favorecido pelo melhoramento de características ligadas à tolerância a estresses, incluindo estresse por altas densidades de plantas, bem como à eficiência na

absorção de água e nutrientes (TOKATLIDIS; KOUTROUBAS, 2004). Entre outros fatores, estão a tolerância a secas, a solos encharcados e a insetos; senescência tardia “*staygreen*” associada à alta relação fonte/dreno durante o período de enchimento de grãos (DUVICK, 1997); menor tamanho do pendão; arquitetura da copa mais compacta; plantas menores com menos folhas, folhas mais curtas e mais eretas que melhoram a interceptação da radiação solar e inserção mais baixa da espiga, promovendo uma maior resistência ao tombamento de plantas (SANGOI et. al., 2002).

Sob alta densidade de plantas, genótipos de arquitetura foliar ereta permitem maior interceptação de luz (FANCELLI; DOURADO-NETO, 2003). Principalmente em estádios vegetativos iniciais há um maior índice de área foliar e melhor aproveitamento da luz solar, o que contribui para o aumento da produtividade (SANGOI, 2000). Por outro lado, o aumento excessivo na população de plantas acarreta o aumento do sombreamento em genótipos onde a arquitetura foliar não é favorável, o que reduz a taxa de fotossíntese e pode prejudicar a formação dos grãos (FLOSS, 2004). A queda na produtividade pode ser atribuída, também, ao aumento da esterilidade (TOLLENAAR, 1992), o que corrobora com Sangoi et al. (2006), para quem o aumento na população de plantas aumentou a esterilidade, alongou o intervalo entre antese e espigamento e reduziu o número de grãos por espiga. Esse efeito negativo tem sido menor nos híbridos modernos, nos quais os ganhos com o aumento da população superam as perdas por planta e propiciam uma maior produção de grãos por área (SANGOI et. al., 2006).

Quando há adequada disponibilidade de recursos no ambiente, manejo cultural para alto rendimento e uso de baixas densidades de plantas, as diferenças no desempenho agrônomo entre híbridos antigos (década de 1930) e modernos (década de 1990) são pequenas. No entanto, as diferenças de produtividade entre híbridos antigos e modernos se elevam à medida que há um incremento na população de plantas e os recursos do ambiente se tornam limitantes. Assim, ressalta-se a capacidade dos genótipos modernos em tolerar as restrições do ambiente em detrimento de uma menor produção por planta (TOLLENAAR; LEE, 2002).

O melhoramento genético contínuo dos híbridos de milho requer pesquisas periódicas que abordem os temas de população de plantas devido às características incorporadas que conferem maior tolerância às altas densidades de plantas e aos estresses a que a cultura é submetida (WIDDICOMBE; THELEN, 2002).

2.4.2 Fatores de solo

A fertilidade do solo se desdobra em componentes físicos, químicos e biológicos – os três estão interligados e não constituem compartimentos estanques. Apesar disso, muito da pesquisa e extensão se concentra na fertilidade química (MALAVOLTA, 2006).

Dentre os fatores de solo responsáveis pela variação na produção, muitos estão relacionados à capacidade de retenção de água e aos condicionantes desta característica (GODWIN et al., 2003). A água do solo é o veículo de transferência de elementos químicos, nutrientes e outras substâncias do solo para as raízes. Em solos que têm menor capacidade de campo, as plantas são mais suscetíveis às deficiências hídricas ocasionais. Solos arenosos apresentam baixos teores de matéria orgânica e, conseqüentemente, baixa capacidade de retenção de água e nutrientes, o que pode ser um limitante à produtividade em condições de restrição hídrica. Em solos argilosos, no entanto, a capacidade de campo é mais elevada, mas o ponto de murcha permanente também o é. Assim, uma maior capacidade de retenção de água é desejável para favorecer a produtividade das culturas, embora solos com essa característica possam apresentar fatores negativos como, por exemplo, maior possibilidade de presença de compactação e má estruturação do solo (RAIJ, 2011).

Especialmente no cultivo de milho de segunda safra, devido ao fato da semeadura ocorrer no final da época chuvosa, a estratégia de antecipá-la pode reduzir a probabilidade de estresse hídrico (SANGOI, 2000). A época de semeadura ideal é menos flexível nos solos arenosos, comparativamente aos argilosos, devido à menor capacidade de retenção de água. Solos argilosos, porém, além de terem maior micro porosidade, geralmente têm melhor fertilidade natural e possibilitam o desenvolvimento mais vigoroso das raízes em profundidade o que, conseqüentemente, melhora a tolerância aos estresses hídricos (RAIJ, 2011).

A produtividade também pode estar relacionada ao relevo, que por sua vez pode ser um fator utilizado para subsidiar o planejamento da semeadura em taxas variadas (SHANAHAN et al., 2004; ABENDROTH; ELMORE, 2007). Um estudo conduzido em Iowa (EUA) observou a produtividade de milho de seis anos associada às variáveis do terreno. Os autores observaram que a relação da altitude relativa e relevo com produtividade é positiva para anos em que a chuva ocorreu acima da média e negativa para anos secos (KASPAR et al., 2003).

Assim, as propriedades do solo devem ser mensuradas e espacializadas para determinar o potencial de produtividade das diferentes regiões de um talhão e auxiliar na tomada de decisão (KHOSLA et al., 2008). Ao identificar as variáveis de solo que estão relacionadas à variabilidade produtiva, é possível determinar áreas de alto e baixo potencial produtivo (ORTEGA; SANTIBANEZ, 2007).

2.5 População de plantas

A população de plantas considerada como ideal é aquela que permite o maior rendimento de grãos por área (FANCELLI; DOURADO-NETO, 2003), sendo que para cada sistema de produção existe uma população ótima que maximiza o rendimento (SANGOY, 2000).

A população de plantas representa o fator de gestão agronômica que mais mudou nas últimas décadas em resposta à tolerância adquirida pelos novos genótipos ao adensamento de plantas (TOLLENAAR; LEE, 2002). No estado de Iowa (EUA), as densidades de plantas aumentaram cerca de 425 plantas por hectare por ano desde 2001 (ABENDROTH; ELMORE, 2007).

O comportamento da produtividade é linear e positivo quando associado à população de plantas até um máximo denominado “ponto crítico”, acima do qual a produção decresce (FANCELLI; DOURADO-NETO, 2003). Os coeficientes de determinação entre produção de grãos e população variaram entre $R^2 = 0,70$ e $R^2 = 0,82$, sendo uma parábola o modelo de regressão melhor ajustado para representar o comportamento entre essas duas variáveis (TOLLENAAR, 1992). Os resultados obtidos por Sangoi et al. (2002) são ainda mais expressivos, com $R^2 = 0,77$ para híbridos mais antigos e $R^2 = 0,97$ para híbridos modernos, pesquisados no sul do Brasil. Esses dados consolidam o comportamento de associação positiva entre população de plantas e rendimento de grãos (HEINIGER, 2010).

Híbridos lançados no intervalo dos anos de 1934 e 1991 mostram melhorias contínuas na tolerância a estresses bióticos e abióticos. Experimentos foram realizados com 36 híbridos de milho adaptados à região central de Iowa (EUA) sob quatro populações de plantas 79000, 54000, 30000 e 10000 pl ha⁻¹. No cultivo sob baixas populações (10000 pl ha⁻¹) as plantas foram expostas a condições mínimas de estresse e se espera o máximo rendimento por planta. Nessa condição, os híbridos lançados em diferentes décadas não apresentaram diferença de produtividade, com $R^2 = 0,06$, ou seja, o incremento na produção por planta foi pequeno ao

longo dos anos. Quando submetidos à população de 79000 pl ha⁻¹, os genótipos mostraram ganhos lineares de produtividade conforme a época de lançamento, com $R^2 = 0,86$. O resultado indica maior dependência dos híbridos modernos ao aumento no número de plantas por área (DUVICK, 1997).

Nas condições do sul do Brasil, região de Lages (SC), populações de plantas (25000, 50000, 75000 e 100000 pl ha⁻¹) foram testadas com diferentes híbridos lançados comercialmente nas décadas de 1960, 1970, 1980 e 1990. Também nessas condições os híbridos modernos se mostraram exigentes a uma maior população de plantas e alcançaram maiores rendimentos sob condições edafoclimáticas favoráveis à obtenção de altos rendimentos. Destaca-se que, nos anos em que os tetos produtivos foram menores não foi observada diferença estatística entre rendimentos das diferentes populações. As populações teóricas que maximizaram o rendimento de grãos foram de 68750, 80218 e 82029 pl ha⁻¹ para os híbridos lançados em 1970, 1980 e 1990, respectivamente (SANGOI *et. al*, 2006).

Tollenaar (1992) avaliou oito níveis de populações de milho onde a mínima foi 5000 pl ha⁻¹ e a máxima foi 240000 pl ha⁻¹ e, nesse caso, a maior produtividade foi obtida entre 140000 e 150000 pl ha⁻¹. Abendroth e Elmore (2007) afirmam que a população ideal pode variar ± 12000 pl ha⁻¹. Shanahan et al. (2004) analisaram dados de produtividade de três anos (1997, 1998 e 1999), dois híbridos de milho e quatro níveis de população de plantas no leste do Colorado (EUA) e concluíram que a densidade ótima de plantas pode variar apenas ± 5000 pl ha⁻¹ entre áreas de alta e baixa produtividade naquela região.

Serpa (2011), ao testar diferentes populações de milho (50000, 700000, 90000, e 110000 pl ha⁻¹) no Rio Grande do Sul, sob diferentes níveis de disponibilidade hídrica, concluiu que, em condições ótimas de disponibilidade hídrica (parcelas irrigadas sempre que necessário) a população ótima foi a máxima testada (110000 pl ha⁻¹) enquanto que, sob condição normal de chuvas, a população ótima ficou em 90000 pl ha⁻¹. Ressalta-se que onde a água e os nutrientes estão facilmente disponíveis observa-se associação positiva entre rendimento e população de plantas. Por outro lado, onde a água é limitante existe uma taxa de semeadura exata com a qual o rendimento é maximizado (HEINIGER, 2010).

A adubação nitrogenada é outro fator que condiciona a possibilidade de incremento na população de plantas e o aumento na produtividade é obtido com acréscimos concomitantes na dose de N e na densidade de plantas. A interação entre adubação nitrogenada na forma de uréia (0; 50; 100; 150 e 200 kg de N ha⁻¹) e população de plantas de milho (25000, 50000, 75000 e 100000 pl ha⁻¹) testada nas condições de cerrado do Sul do Maranhão mostrou-se

significativa e a máxima produtividade de grãos de milho (11900 kg ha^{-1}) foi obtida com $120 \text{ kg de N ha}^{-1}$ e 83000 pl ha^{-1} (MELO et al., 2011).

2.6 Semeadura em taxas variáveis

Em estudo realizado por Horbe et al. (2013), nas condições de safra de verão no sul do Brasil a semeadura em taxas variáveis (STV) permitiu otimizar a população de plantas de milho com incrementos de produtividade. Houve aumento de produtividade de 1200 kg ha^{-1} e 1900 kg ha^{-1} em áreas de gestão de baixo desempenho devido à redução na população de plantas para 49816 pl ha^{-1} e 46242 pl ha^{-1} em relação à população padrão 70000 pl ha^{-1} , o que equivale a uma redução média de 29% na taxa de semeadura. Em áreas de alto desempenho, o incremento médio de produtividade foi de 880 kg ha^{-1} e 940 kg ha^{-1} devido ao aumento na população de plantas para 77666 pl ha^{-1} e 81576 pl ha^{-1} em relação à população padrão de 70000 pl ha^{-1} . Nesses casos, os ganhos econômicos foram de aproximadamente 25% em área de baixo desempenho e 6% em áreas de alto desempenho.

A variação nas taxas de semeadura em 5000 pl ha^{-1} entre UGD reduziu $6,25 \text{ US\$ ha}^{-1}$ nos custos com sementes (SHANAHAN et al., 2004). No entanto, se a população de plantas ficar abaixo do ótimo econômico os rendimentos decrescem significativamente; já se a população fica acima do ótimo econômico, incorre-se em custos desnecessários (BLAKE, et al., 2003). Para Lowenberg-Deboer (1998), a STV seria lucrativa apenas para aqueles produtores que possuem terras com baixo potencial produtivo e quando a porção dessas terras for pequena. Bullock et al. (1998), a partir de um amplo estudo na região do Cinturão do Milho (EUA), concluíram que a STV seria inviável devido aos custos elevados associados à caracterização da variabilidade das áreas, etapa que antecede a prática da semeadura, necessária para definir as UGD onde serão recomendadas diferentes taxas de sementes.

A partir da variabilidade observada nos mapas de produtividade é possível variar a população de milho dentro do talhão e obter aumento de produtividade (SHANAHAN et al. 2004). Molin et al. (2006) identificaram correlações positivas ($r = 0,64$) para o aumento da densidade de plantas e a produtividade da cultura do milho, mesmo utilizando a população máxima 71000 pl ha^{-1} que está aquém da população para se obter a produtividade máxima.

O mapeamento de atributos de solo e planta de forma rápida e com baixo custo se estabelece como pré-requisito para tornar viável a operação de semeadura em taxas variáveis e as informações desses atributos devem ser utilizadas para determinar a população ótima em

cada ponto do talhão. A necessidade de agilizar o processo de coleta de dados a campo reduzindo custo de tais caracterizações demanda ferramentas capazes de coletar grande quantidade de dados e gerar boas correlações com atributos do solo e produtividade (SHANAHAN et al., 2004).

Embora ainda não seja possível determinar qual a estratégia ideal para tratar a variabilidade e quais os parâmetros mais adequados a serem utilizados para orientar uma intervenção localizada, é possível sugerir estratégias com boas perspectivas de incremento na rentabilidade (KING et al., 2005). Sobretudo, havendo variação na qualidade do solo (textura, estrutura, umidade, compactação) ao longo do talhão, é plausível variar a população de plantas (GRIFFIN, 2010).

3 METODOLOGIA

3.1 Caracterização do ambiente de estudo

Ao longo de três anos de pesquisa foram conduzidos múltiplos experimentos em lavouras comerciais de milho: três experimentos em ambiente tropical, na região Centro-Oeste do Brasil e três experimentos em ambiente subtropical, na região Sul do Brasil.

As áreas experimentais foram selecionadas em função da região geográfica, da disponibilidade do acervo de mapas de produtividade e da disponibilidade de equipamentos para realizar a semeadura de milho em diferentes taxas de populações de plantas por área.

Os experimentos realizados na região Centro-Oeste foram conduzidos durante a segunda safra de verão (safrinha) nos anos de 2013, 2014 e 2015 em um talhão no município de Maracajú (MS), a 384 m de altitude sobre Latossolo. Ao longo dos anos, a semeadura foi realizada entre as duas últimas semanas do mês de fevereiro. O sistema de cultivo praticado na área experimental é de sucessão soja/milho safrinha cultivados em plantio direto na palha (SPD).

Os experimentos realizados na região Sul foram conduzidos durante a safra de verão nos anos de 2013, 2014 e 2015 em um talhão no município de Piraí do Sul (PR) a 1036 m de altitude e sobre Latossolo. A semeadura dos experimentos foi realizada entre a última semana de setembro e a primeira semana de outubro. O sistema de cultivo praticado na área experimental é de rotação de culturas; no verão é produzida soja após milho e, no inverno, aveia para cobertura de solo após trigo, cultivadas em plantio direto na palha (SPD).

Foram definidas duas etapas para a execução da pesquisa. Primeiramente, foram selecionadas as áreas experimentais e definidas as partes do talhão com diferentes potenciais de desempenho, as UGD de alto desempenho e UGD de baixo desempenho. Essa etapa foi realizada antes da semeadura, em experimentos com população de plantas. A segunda etapa consistiu na implantação dos experimentos em faixas com diferentes híbridos de milho em diferentes níveis de população de plantas por área.

Os fatores testados foram: população de plantas, híbridos de milho e áreas com diferentes potenciais de desempenho (áreas de alto potencial desempenho e áreas de baixo potencial de desempenho). A variável resposta observada foi a produtividade de milho em kg ha⁻¹.

3.2 Delimitação das Unidades de Gestão Diferenciada (UGD)

A delimitação das UGD precedeu a implantação dos experimentos em faixas. Para a definição das UGD foram utilizados mapas de CE do solo, histórico de mapas de produtividade e mapa da altitude relativa. As UGD foram delineadas e classificadas em áreas de baixo potencial de desempenho, região de transição, e área de alto potencial de desempenho.

O histórico de mapas foi composto por mapas de produtividade de diferentes culturas e diferentes safras com o objetivo de contemplar as variabilidades espacial e temporal, ao mesmo tempo que reduz o efeito de ruídos pontuais.

Os dados de CE utilizados na definição das UGD foram coletados com o equipamento Veris3100® (Veris Technologies, Salina, KS). As medições de CE foram efetuadas no primeiro ano, antes da semeadura, de maneira a mapear a CE do solo no talhão. Foram feitas passadas paralelas entre si com o equipamento a cada 20 m (Figura 1):

Figura 1 - Conjunto sensor utilizado para coleta de dados de CE do solo. (a) conjunto utilizado em operação a campo; (b) computador de bordo

O equipamento utilizado mede a CE do solo pelo método de contato direto, com discos de corte lisos que funcionam como eletrodos e cortam os resíduos vegetais penetrando no solo. Seis discos devidamente espaçados entre si permitem leituras de CE em duas profundidades, de aproximadamente 0 – 0,3 m e 0 – 0,9 m. Dois discos são utilizados para emitir corrente elétrica alternada no solo e quatro discos, dois para cada profundidade, medem a voltagem resultante. A velocidade de operação recomendada pelo fabricante é de até 7 m s⁻¹. Esse equipamento possui um coletor de dados próprio e realiza a gravação dos valores de CE para as duas profundidades simultaneamente com dados de latitude, longitude e altitude. A

frequência de gravação de dados é de 1 Hz (um ponto por segundo) e as informações são armazenadas em arquivo digital no formato texto. Os valores de CE são expressos em mS m^{-1} . As medições de CE foram todas georreferenciadas automaticamente pelo sistema integrado do equipamento utilizando um receptor GPS Ag-Star™ (Novatel®, Calgary, Alberta, Canada) de frequência L1 com correção por algoritmo interno. Para melhorar a penetração dos discos e o contato com o solo foram utilizados lastros.

Adicionalmente à coleta de dados de CE foram coletadas amostras de solo georreferenciadas para determinação de atributos físico-químicos do solo que foram utilizados para auxiliar na interpretação dos dados de produtividade em função da variabilidade espacial desses atributos. As amostras foram coletadas na profundidade de 0-20 cm, orientadas por uma grade regular com densidade de 2 amostras ha^{-1} ou 0,5 ha amostra ha^{-1} . Cada amostra foi composta de dez subamostras coletadas aleatoriamente em um raio de até 5,0 m do ponto central com o propósito de caracterizar o ponto.

Os dados de produtividade foram coletados ao longo dos anos pelos produtores de cada local de estudo e, por ocasião dos experimentos, as colheitas foram realizadas com acompanhamento do pesquisador. Na área experimental localizada no PR, os dados de colheita foram coletados desde 2009 com colhedoras JD 9650 (John Deere®, Horizontina, RS, Brasil) equipadas com receptores GPS SF1 (John Deere®, Horizontina, RS, Brasil) de categoria L1 com correção diferencial (SF1), sensor gravimétrico de produtividade que mede a massa de grãos colhido e sensor de umidade. Nas áreas localizadas no MS, os dados foram coletados desde 2009 com colhedoras JD 9650 (John Deere®, Horizontina, RS, Brasil) equipadas com piloto automático integrado, receptores GPS SF2 (John Deere®, Horizontina, RS, Brasil) de categoria L1/L2 com correção diferencial via satélite, sensor gravimétrico de produtividade, e sensor de umidade.

A frequência de gravação dos dados de produtividade é de 1 Hz (um ponto por segundo) que equivale a uma amostra de produtividade a cada 1,4 m deslocado pela colhedora, considerando a velocidade de deslocamento de 5 km por hora. A alta densidade amostral associada à remoção de dados errôneos possibilitam boa precisão comparativa dos valores de produtividade obtida para os diferentes híbridos e populações nas diferentes partes do talhão.

O peso do grão úmido é corrigido automaticamente pelo sistema computacional da colhedora para a base de 13% de umidade e tem como referência os dados de umidade coletados pelo sensor de umidade instalado na colhedora. Essas informações são armazenadas em arquivo digital juntamente com o nome do híbrido e população correspondente a cada

faixa; essas últimas informações são informadas manualmente pelo operador no sistema da colhedora.

Previamente às colheitas procedeu-se a calibração dos sensores de produtividade e umidade, conforme especificações do fabricante. Para tanto, foi colhido determinada quantidade de grãos e pesado em balança digital para calibração do sensor da máquina; esse procedimento é feito até que o valor registrado pelo sensor se iguale ao valor registrado na balança. O mesmo procedimento é feito para calibração dos dados de umidade dos grãos.

Nas colheitas realizadas no sul do Brasil, em relevo ondulado, foi mantido sempre o mesmo sentido de colheita das faixas para evitar erros decorrentes da inclinação do sensor que mede a massa de grãos. A velocidade da máquina foi padronizada em $1,38 \text{ m s}^{-1}$ (5 km h^{-1}) visando reduzir erros de medição de produtividade em função da oscilação da velocidade de operação da máquina.

Os dados de produtividade e de CE foram filtrados para a remoção de dados discrepantes de acordo com a metodologia proposta por Spekken et al. (2013). Esse método de remoção de dados permite analisar individualmente cada ponto de dados brutos (cada amostra de produtividade coletada pelo sensor da colhedora) e a compara com os pontos das passadas adjacentes. Pela comparação com os seus vizinhos é possível identificar pontos inconsistentes “*outliers*” que podem prejudicar a correta interpretação dos dados removê-los. Ao utilizar o método comparativo se mantêm pontos coletados em regiões do talhão onde a produtividade é extremamente baixa ou extremamente alta, desde que esses sejam consistentes com seus vizinhos, o que caracteriza uma região homogênea no talhão. Assim, é preservada a variabilidade espacial que é o pressuposto para definição das UGD.

Na sequência, os dados foram processados com o uso do Sistema de Informação Geográfica SSToolbox® 3.4 (SST Development Group, Stillwater, OK, USA), onde foram transformados em superfícies utilizando o interpolador “inverso da distância elevada ao quadrado”, de acordo com Moore (1998). A partir destes, foram gerados mapas individuais para cada safra, no formato *raster*, com pixels de 20 x 20 m georreferenciados pelo ponto central do pixel. O pixel definido para cada talhão foi o mesmo nos diferentes mapas das diferentes safras e atributos permitindo, assim, a comparação dos dados obtidos ao longo dos anos. Para comparação de mapas, os valores de cada pixel foram normalizados em relação à média do talhão para cada safra. A sequência de procedimentos está ilustrada na Figura 2.

Figura 2 - Procedimentos de análise dos dados para definição das Unidades de Gestão Diferenciada (UGD)

Depois de normalizados, os mapas foram analisados conforme metodologia proposta por Molin (2002) para definição das UGD. As UGD foram classificadas em três classes, conforme o percentual médio de cada pixel após unir os mapas com diferentes atributos (produtividade, CE e altitude), onde a área de baixo desempenho é $< 95\%$ da média geral; a área de transição compreende valores de 95% a 105% da média e a área de alto desempenho é $> 105\%$ da média (Figura 3).

Figura 3 - Definição de UGD a partir do histórico de mapas de produtividade, CE e altitude

Outro método utilizado na delimitação das UGD foi o método estatístico multivariado de agrupamentos ou “cluster” (KHOSLA, et al., 2008; ORTEGA; SANTIBANEZ, 2007; KING, et al. 2005; SCHEPERS, et al., 2004) No caso, os grupos foram definidos com base no método não supervisionado de agrupamento por *K-means*, “Average Linkage”. Foram

previamente estabelecidas a formação de três “clusters” pela viabilidade da interpretação prática dos resultados e facilitação da definição de estratégias de gestão por parte do produtor, além disso, é possível a comparação com o método das médias normalizadas.

3.3 Experimentos em faixas

Depois de definidas as UGD foram realizados os experimentos em faixas, variando híbridos de milho e população de plantas ao longo das diferentes UGD. Durante os três anos de experimentação foram utilizados, ao todo, 13 híbridos de milho (Tabela 1) e cinco taxas de semeadura (Tabela 2). Os híbridos testados foram selecionados com base na disponibilidade de híbridos de cada fazenda em cada ano e nem sempre foi possível repetir os mesmos ao longo dos anos.

Tabela 1 - Caracterização dos híbridos de milho utilizados em cada ambiente

	Híbrido*	Companhia	Ciclo **	População recomendada (Pl ha ⁻¹)
Safrade verão Região Sul (PR) Ambiente subtropical	P30R50	Pioneer	760	70000 - 80000
	P30F53	Pioneer	766	70000 - 80000
	DKB 245	Dekalb	834	65000 - 70000
	DKB 240	Dekalb	826	75000 - 80000
	AS1656 Status	Agroeste Syngenta	820 875	65000 - 75000 60000 - 65000
Segunda safra de verão Região Centro Oeste (MS) Ambiente tropical	AG 8500	SementesAgrocere	860	50000 - 55000
	AG 9030	SementesAgrocere	795	55000 - 65000
	AG 9040	SementesAgrocere	790	55000 - 60000
	AG 8780	SementesAgrocere	820	50000 - 55000
	30A37	Morgan Sementes	810	50000 - 60000
	DKB 177	Dekalb	860	55000 - 65000
	DKB 285	Dekalb	795	50000 - 60000

* Híbridos simples; **Ciclo em graus dia (GDU) calculado segundo a fórmula: [(temperatura máxima + temperatura mínima)/2]-10 somados para cada dia, da emergência ao florescimento. Para temperatura máxima diária maior do que 30°C usa-se 30°C na fórmula. Para temperatura mínima abaixo de 10°C usa-se 10°C na fórmula.

As taxas de semeadura foram calculadas a partir da população de plantas regularmente recomendada para cada região (Tabela 2).

Tabela 2 - Populações de plantas desejada a partir da população regularmente recomendada nas regiões de estudo para primeira e segunda safras de verão

	População de plantas (pl ha ⁻¹)				
	100% do				
	menos 40%	menos 20%	regularmente recomendado	mais 40%	mais 20%
Safra de verão (PR)	42000	56000	70000	98000	84000
Segunda safra de verão (MS)	33000	44000	55000	77000	66000

Os tratos culturais como adubação de base, adubação de cobertura, aplicação de defensivos e tratamento de sementes seguiram os padrões utilizados pelos produtores de cada uma das áreas, tendo como base o recomendado para a população média.

A operação de semeadura dos experimentos foi viabilizada através da instalação de um sistema acionador composto por um motor hidráulico e controlador de vazão para a regulação eletrônica da sua rotação que determina as taxas de sementes. O sistema utilizado foi o Vcon5.6[®] (Verion, Guarulho, SP, Brasil). O controle da população de sementes é feito pelo computador de bordo, complementar ao sistema, instalado na cabine do trator, onde é inserido o arquivo que contém as doses georreferenciadas e que controla a rotação do motor hidráulico que aciona os mecanismos dosadores da semeadora em substituição à roda de terra. Destaca-se que este sistema também monitora em tempo real a queda de sementes a partir dos sensores instalados nos tubos condutores (Figura 4).

- 1- Motor hidráulico que substitui a roda de terra
- 2- Antena GPS L1
- 3- Sensor de sementes a ser instalado no tubo condutor de sementes
- 4- Computador de bordo

Figura 4 - Equipamentos utilizados para gerenciar e monitorar as taxas de semeadura

Os dados da operação de semeadura dados da operação (velocidade de trabalho, dose recomendada, dose aplicada pelo motor e dose registrada pelo sensor de sementes) foram

georreferenciados com receptor GPS Ag-Star™ (Novatel®, Calgary, Alberta, Canada) de categoria L1 com correção por algoritmo interno e registrados automaticamente em arquivo digital formato “txt”.

A semeadora utilizada no PR foi a JD 2115 (John Deere®, Horizontina, RS, Brasil) com 13 linhas, e no MS foi a Fankhauser 5056 (*Fankhauser*®, Tuparendi, RS, Brasil) com 24 linhas. As semeadoras utilizadas possuem sistema dosador de sementes pneumático e espaçamento entre linhas de 0,5 m.

O tamanho das faixas foi de até 1200 m de comprimento e obedeceu a largura da semeadora utilizada em cada local. O comprimento das faixas variou de tamanho devido às mudanças no comprimento dos talhões e largura da semeadora (Figura 5).

Figura 5 - Croqui de um dos experimentos em faixas mostrando a disposição das faixas ao longo da área experimental

Vinte dias após a semeadura foi feita a avaliação da distribuição longitudinal de plantas e definição da população efetiva seguindo os parâmetros estabelecidos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (1989). De acordo com essa norma, são

considerados espaçamentos falhos $X > 1,5X_{\text{ref}}$, espaçamentos múltiplos $X < 0,5X_{\text{ref}}$, e espaçamentos aceitáveis $0,5X_{\text{ref}} < X < 1,5X_{\text{ref}}$ em que X_{ref} é o espaçamento desejado para atingir a população planejada e X é o espaçamento real obtido no campo.

A colheita dos experimentos em faixas com a correspondente coleta de dados de produtividade foi feita individualmente para cada faixa utilizando-se de uma colhedora equipada com monitor de produtividade e receptor GPS para georreferenciamento dos dados de produtividade. Os dados foram gravados com frequência 1,0 Hz. Os sensores de produtividade e umidade instalados na colhedora foram calibrados, seguindo as recomendações do fabricante antes de iniciar a colheita, conforme detalhado anteriormente.

Cada registro da massa de grãos feito pelo sensor da colhedora foi considerado uma observação. Assim, considerando uma faixa de 1000 m e a velocidade da colhedora de $1,66 \text{ m s}^{-1}$, foram registrados 602 observações de produtividade em uma faixa de experimento de 1000 m. Os dados de produtividade foram vinculados às UGD em que foram coletados, bem como ao híbrido e à população de plantas utilizada para posterior análise estatística.

3.4 Análises estatísticas

Nesta pesquisa foi empregada a análise estatística descritiva com o propósito de caracterizar os dados e fazer inferências tais como: valores máximos, mínimos, médias, medianas, frequências, desvio-padrão e coeficiente de variação para os dados de produtividade e distribuição longitudinal de plantas.

Os dados de produtividade referentes aos híbridos, população e UGD foram submetidos à análise de variância pelo F-teste e ANOVA, nos quais foram considerados como fatores qualitativos híbridos e UGD e fator quantitativo população de plantas. Quando houve diferença ao nível de significância de $P < 0,05$ entre tratamentos procedeu-se o desdobramento da análise até interação tripla.

Os dados de cada UGD foram analisados separadamente através da análise de regressão com a finalidade de encontrar o melhor modelo ajustado para determinado híbrido e UGD em função da população.

Para a análise de rentabilidade econômica foi fixado o custo total por hectare em R\$1650,05, proposto por Richetti e Ceccon (2015) em estudo específico para a região do MS. Os pressupostos utilizados pelos autores para o cálculo do custo foram: a utilização de milho híbrido simples geneticamente modificado com a introdução de genes de *Bacillus*

Thuringiensis (Bt) e o cultivo consorciado com *Brachiaria ruziziensis*. Foram considerados os preços dos produtos vigentes no mês de junho de 2014, os custos operacionais com insumos, operações mecanizadas, implementos e serviços (mão de obra), custos de oportunidade como remuneração do fator terra, representado pelo valor do arrendamento e a remuneração do capital de custeio e de investimento (juros de 6% ao ano, por um período de 5 meses). O preço da saca de milho de 60 kg considerado foi R\$ 19,00, preço médio no MS para os últimos 10 anos.

Foram analisados três cenários simulando três diferentes valores para aquisição de sementes de milho e estabelecidos três níveis de preço para saca de 60 mil sementes: R\$240,00; R\$310,00 e R\$400,00. Os programas computacionais utilizados para as análises estatísticas e confecção de gráficos foram o Microsoft Excel[®] (Microsoft Office, 2015), o software estatístico R[®] (R Development Core Team, 2012) e o software Spotfire[®] (TIBCO software Inc, 2016).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Delimitação das unidades de gestão diferenciadas

Estabelecido o pressuposto das variabilidades espacial e temporal das lavouras como fundamento para a gestão em UGD apresenta-se, na Figura 6, o conjunto de mapas de produtividade e CE do solo e altitude, referentes à área experimental no MS. Os mapas são as camadas de informação que compõem o banco de dados para delimitação das UGD da área experimental da região centro-oeste do Brasil (MS).

Figura 6 - Acervo de mapas que compõem o banco de dados para delimitação das UGD da área estudada na região Centro-Oeste do Brasil (MS)

A análise visual dos mapas nos permite uma estimativa aproximada da variabilidade dentro de cada mapa e entre os diferentes mapas. Observou-se coerência entre as variabilidades espacial e temporal presentes nos mapas de produtividade de milho 2009 e produtividade de soja 2013, além da coerência destes com a conformação das “manchas” observadas no mapa de CE do solo.

Destaca-se, ainda, a similaridade entre a variabilidade espacial dos mapas de produtividade e CE do solo. As regiões de maior produtividade coincidem com as regiões de maior CE. O coeficiente de determinação entre os mapas de milho 2009 e CE na camada de 0 a 30 cm foi de $R^2 = 0.65$.

Na Figura 7 é apresentada a distribuição dos dados de produtividade que dão origem aos mapas de milho 2009 e milho 2012. Observa-se uma distribuição normal dos dados de milho 2012, diferentemente dos dados de milho 2009 que, no mapa da figura anterior, apresentou “manchas” mais evidentes.

Figura 7 - Distribuição dos dados de produtividade de milho 2009 e milho 2012 referentes à área de estudo na região Centro-Oeste do Brasil (MS)

A curva de distribuição mais achatada indica uma maior dispersão dos dados analisados, enquanto que uma curva em forma de sino, tendendo à distribuição normal dos dados, indica a concentração de dados em torno da média do conjunto de dados.

Este resultado mostra que a variação dos dados de produtividade foi maior no mapa de milho 2009 do que no mapa de milho 2012. O CV do MP de milho 2009 foi de 29.5%, enquanto o CV do MP de milho 2012 foi de 9%. Conforme apresentado no gráfico, o DP foi de 1200 kg ha⁻¹ para mapa de milho 2009 e 594 kg ha⁻¹ para o mapa de milho 2012. A baixa variabilidade nos dados de milho 2012 dificulta a formação de “manchas” e justifica a ausência de correlação entre os dois mapas.

Seguindo esta mesma linha de raciocínio, é apresentado na Figura 8 o histograma dos dados de CE do solo na profundidade de 0 a 30 cm.

Figura 8 - Distribuição dos dados CE do solo na profundidade entre 0 e 30 cm referente à área de estudo na região Centro-Oeste do Brasil (MS)

Os dados de CE não apresentaram distribuição normal, do mesmo modo como observado no MP de milho 2009. O CV foi de 40% e o DP foi 8.2 mS m⁻¹. Esses resultados indicam uma alta variabilidade dos dados de CE para a área de estudo no MS.

A CE do solo comumente apresenta boa correlação e correlação positiva com a produtividade das culturas, por isso entende-se que tem potencial para uso no planejamento de semeadura em taxas variáveis (SHANAHAN et al., 2004; ABENDROTH; ELMORE, 2007). Vale salientar, ainda, que a coleta dos dados de CE foi realizada no mês de fevereiro de 2013, buscando uma condição de umidade do solo próxima à capacidade de campo, visando caracterizar a variabilidade inerente a cada lavoura e mostrou ser eficiente em identificar a variabilidade espacial da área de estudo.

Por ser uma medida indireta resultante de uma série de variáveis físicas e químicas dos solos, a CE carrega informações que podem traduzir o potencial de desempenho dos solos nos diferentes pontos da lavoura. Molin e Castro (2008) reportaram correlação forte e moderada entre CE do solo na camada superficial (0 – 30 cm) e atributos de solo (pH, soma de bases SB, Ca, Argila, Areia, V%, K, Mg e M.O.). Além disso, a CE é de fácil mensuração, tem alto rendimento operacional e baixo custo quando comparada à amostragem de solo em grade (SHANAHAN et al. 2004). Esses são alguns dos motivos que levam ao emprego dessa prática para definir potencial de desempenho das áreas. Paralelamente, dados de fertilidade do solo

podem vir a contribuir para o entendimento das causas da variabilidade espacial evidenciada pela CE.

Com base no histórico de mapas discutidos anteriormente, mapas de colheita, mapa de CE e mapa de altitude, foram definidas as UGD para a área de estudos na região Centro-Oeste do Brasil (MS) (Figura 9) conforme metodologia definida por Molin (2002).

Figura 9 - Mapa das UGD para o talhão de estudos em ambiente topical no Centro-Oeste do Brasil (MS)

O mapa foi classificado em três UGD, conforme o percentual médio de cada pixel. Pixels com valores $< 95\%$ da média geral foram classificados como área de baixo desempenho, pixels com valores entre 95% e 105% da média foram classificados como área de transição e pixels com valores $> 105\%$ da média foram classificados como área de alto desempenho.

A definição de três níveis de UGD facilita o entendimento prático da variabilidade presente na área e possibilita discernir entre as regiões que apresentam diferente potencial de desempenho dentro do talhão. LY et al., (2007) defendem que o número de UGD depende da variabilidade do talhão e do nível detalhe que se busca, e concluíram que a divisão em três níveis provou ser a melhor combinação entre o nível de detalhe e os padrões de variabilidade visualmente discernível.

Ao aplicar o método de “cluster” por “k-mean” na definição das UGD, utilizando a mesma base de dados, foi observada mudança pouco expressiva na formação das UGD, que foram similares para os dois métodos utilizados. O coeficiente de determinação entre os mapas de UGD geradas pelos dois diferentes métodos foi de $R^2=0.8$ (Figura 10).

Figura 10 - Mapas de UGD resultante de diferentes métodos. (a) UGD delimitada com base no histórico de mapas normalizados; (b) Delimitação das UGD com base no método de agrupamentos “k-mean”; (c) Imagem de satélite da área de estudo obtida em estágio vegetativo (V8) da cultura do milho. Região Centro-Oeste do Brasil (MS)

Sugere-se que, quando a variabilidade espacial e temporal das áreas de cultivo é consistente e o grau da variabilidade justifica adotar a gestão diferenciada da lavoura, o método utilizado para definir essas regiões pouco interfere no resultado final da delimitação das UGD. Essa constatação a respeito da definição das UGD fica mais evidente quando observamos a imagem de satélite do talhão na fase vegetativa (V8) da cultura do milho (Figura 10, c). Apenas com a imagem de satélite é possível identificar a variabilidade espacial presente na área e assim apontar regiões onde a cultura apresenta potencial de desempenho distinto, embora não seja possível determinar o motivo de tal variabilidade.

Khosla et al. (2008) obtiveram resultados similares independentemente do método de formação de UGD e concluíram que métodos mais simples de definição de UGD (considerando o conhecimento do produtor sobre a área em estudo, por exemplo), mais baratos e que levem em conta um menor número de variáveis, podem ser mais eficientes na caracterização da variabilidade espacial e na definição do potencial de desempenho das UGD.

Os valores de CV e as médias de produtividade dentro de cada UGD referente aos MP de milho 2009 e MP de milho 2012 para os dois métodos de agrupamentos são apresentados na Tabela 3 como indicadores da variabilidade interna das UGD.

Tabela 3 - Análise descritiva dos valores de produtividade de milho 2009 e milho 2012 nas UGD obtidas por dois métodos diferentes, método da média normalizada e método de “cluster k-means”

		Milho 2009		Milho 2012	
		Método da média normalizada	Método K-means	Método da média normalizada	Método K-means
UGD Baixo Desempenho	Média (kg ha ⁻¹)	3151,9	3464,6	6785,2	6796,6
	CV (%)	19	25	8	8
UGD Transição	Média (kg ha ⁻¹)	4290,9	4683,6	6783,1	6555,0
	CV (%)	17	24	8	9
UGD Alto Desempenho	Média (kg ha ⁻¹)	5374,7	5120,3	6808,9	6901,4
	CV (%)	13	19	10	10
Total do talhão	Média (kg ha ⁻¹)	4098,3		6793,3	
	CV (%)	29		9	
	Máximo (kg ha ⁻¹)	7525,8		8669,4	
	Mínimo (kg ha ⁻¹)	1887,4		5056,4	

O propósito de agrupar os dados de um talhão em UGD é alcançar uma maior homogeneidade interna às UGD e maior heterogeneidade entre UGD, comparativamente ao valor da média geral do talhão.

Ambos os métodos utilizados foram eficientes na formação de UGD ao proporcionarem maior homogeneidade internas às UGD comparativamente a media geral do talhão. Ainda, o método de formação de UGD pela média normalizada proporcionou uma maior homogeneidade interna das UGD. O CV das UGD foi menor quando utilizado o método da média normalizada comparativamente ao método “k-means”. Em média, o CV foi 6.3% menor com a aplicação do método de geração de UGD pela média normalizada comparativamente ao CV obtido pela aplicação do método de “k-means”. Quando comparado ao CV médio do talhão, sem a divisão em UGD, o método da média normalizada apresentou CV 12,7% menor.

A diferença de produtividade entre as UGD foi de até 60%, o que significa diferença de 2.222,8 kg ha⁻¹ a mais na UGD de alto potencial de desempenho em comparação com a UGD de baixo potencial de desempenho. Schepers et al. (2004) obtiveram resultados de diferença de produtividade entre UGD de até 25%. Os mesmos autores destacam que em anos adversos, com chuvas abaixo ou acima da média, a diferença de produtividade entre UGD pode ser inferior a 5%; nesse caso, a inconsistência temporal pode ser um sério limitante a adoção de estratégias gestão diferenciadas em UGD.

Para avaliar se a abordagem que utiliza a CE do solo, mapas de produtividade e mapa de altitude na definição de UGD poderia ser utilizada efetivamente para caracterizar a variabilidade espacial de atributos do solo (CE, pH, CTC Efetiva, Argila, Areia, V% e M.O.), foram analisadas as amostras georrefenciadas atribuídas às diferentes UGD.

Os resultados da análise de variância (ANOVA) dos atributos de solo apresentaram diferença estatística significativa entre as três UGD (Tabela 4). Houve incrementos no sentido da UGD de baixo para a UGD de alto potencial de 112% nos valores de CE do solo, 8.3% nos valores de pH, 31% nos valores de CTC Efetiva, 18% nos valores de Areia, 16% nos valores de saturação de base (V%), 8% nos valores de M.O., e 28% nos valores de potássio (K). Ainda, uma redução de 57% nos níveis de Alumínio (Al) e redução de 6% nos valores de Argila.

Tabela 4 - Análise de variância dos atributos de solo, condutividade elétrica (CE), pH, alumínio (AL), capacidade de troca de cátions efetiva (CTC Efetiva), Argila, Areia, saturação de bases (V%), matéria orgânica (M.O.), potássio (K) e fósforo (P) na camada superficial do solo (0 – 20 cm) para as três diferentes UGD obtidas pelo método da média normalizada

Atributos de solo	UGD de Baixo desempenho	UGD de transição	UGD de Alto desempenho	Análise de variância P valor
N de amostras	46	19	35	
CE 0-30 cm	13,8	18,4	29,3	<0,0001
pH CaCl ₂	5,1	5,5	5,6	<0,0001
Al mmolc dm ⁻³	2,4	1,3	1,0	0,0023
CTC Efetiva mmolc dm ⁻³	112,7	139,6	147,6	<0,0001
Argila g/kg	615,9	621,4	577,8	0,0030
Areia g/kg	187,2	175,3	221,9	<0,0001
V%	70,7	78,0	82,0	<0,0001
M.O. g dm ⁻³	41,3	45,2	44,7	0,0134
K mmolc/dm ³	10,6	12,3	13,6	0,0002
P mg dm ⁻³	15,4	11,6	12,6	0,0921

A análise estatística mostra que as diferentes UGD apresentaram diferenças nos níveis produtividade, CE do solo e concentração de nutrientes, indicando que os procedimentos utilizados neste estudo para a definição de UGD foram eficientes.

Ao utilizar mapas históricos de produtividade, mapa de CE do solo na camada superficial (0 – 30 cm) e mapa de relevo, foi possível discriminar a variabilidade espacial de atributos de solo que, provavelmente, estejam influenciando a produtividade. Deste modo,

atributos físicos e químicos do solo podem auxiliar a explicar o potencial de desempenho das UGD.

Estes resultados corroboram os resultados obtidos por Schepers et al. (2004) ao discriminarem atributos do solo através de UGD baseadas em imagem de satélite, mapa de CE do solo e altitude.

Além dos dados analisados para a região Centro-Oeste (MS), nas Figuras 11 e 12 é apresentado o acervo de mapas utilizados para a delimitação das UGD em ambiente subtropical da região Sul do Brasil (PR). Foram analisados dois talhões, um no ano de 2013 e outro no ano de 2014.

Figura 11 - Acervo de mapas que compõem o banco de dados para delimitação das UGD na região Sul do Brasil (PR). Área experimental utilizada no ano 2013

Figura 12 - Acervo de mapas que compõem o banco de dados para delimitação das UGD na região Sul do Brasil (PR). Área experimental utilizada no ano 2014

A variabilidade espacial e temporal está presente nos dois talhões estudados, no entanto tanto as variabilidades espacial quanto temporal são pouco consistentes, apresentam “manchas” pequenas e dispersas ao longo do talhão.

Nas Tabelas 5 e 6 são apresentados os valores dos coeficientes de correlação entre os mapas de cada talhão.

Tabela 5 - Matriz de correlação de mapas da área experimental estudada no ano de 2013 na região Sul do Brasil (PR)

	Altitude	Soja 2009	Milho 2010	Trigo 2010	Soja 2011	Trigo 2011	CE 0 – 30 cm
Altitude	1,00						
Soja 2009	0,25	1,00					
Milho 2010	-0,06	0,16	1,00				
Trigo 2010	-0,33	0,04	0,40	1,00			
Soja 2011	0,20	0,24	0,22	0,10	1,00		
Trigo 2011	-0,25	0,09	0,21	0,26	-0,01	1,00	
CE 0 – 30 cm	0,29	0,00	-0,12	-0,11	0,05	-0,22	1,00

Tabela 6 - Matriz de correlação de mapas da área experimental estudada no ano de 2014 na região Sul do Brasil (PR).

	Altitude	CE 0-30cm	CE 30-90 cm	Milho 2011
Altitude	1,00			
CE 0-30 cm	0,01	1,00		
CE 30-90 cm	0,19	0,84	1,00	
Milho 2011	0,07	0,01	0,02	1,00

A correlação entre os mapas dos dois talhões foi baixa e indica inconsistência na variabilidade temporal dos dados; regiões do talhão que apresentam altas produtividades em um ano não apresentam a mesma tendência no ano seguinte e tão pouco relação oposta. Destaca-se a correlação entre os mapas de milho e trigo e destes com a altitude do talhão estudado em 2013. E, ainda, uma alta correlação de 0.84 entre os valores de CE do solo em diferentes profundidades (profundidade de 0 – 30 cm e profundidade de 30 – 90 cm) no talhão estudado em 2014. Os mapas de soja apresentaram os menores índices de correlação. Nas Figuras 13 e 14 são apresentados histogramas dos dados do talhão estudado em 2013 na região sul. Os resultados indicam uma baixa dispersão dos dados em relação à média; a variabilidade espacial dos mapas também é baixa, conforme se observa pelos valores dos CV e pelo achatamento da curva em cada um dos gráficos dos diferentes atributos, à exceção dos dados de Trigo 2011.

Figura 13 - Distribuição dos dados de produtividade de soja 2009; milho 2010; trigo 2010; soja 2011 e trigo 2011, referentes à área de estudo na região Sul do Brasil (PR), em 2013

Figura 14 - Distribuição dos dados de CE do solo na camada de profundidade de 0 a 30 cm referentes à área de estudo na região sul do Brasil (PR) estudada no ano de 2013

Os dados de CE do solo não revelam alta variabilidade espacial no talhão. O CV da CE do solo na camada de 0 a 30 cm foi de 18% enquanto o CV do mesmo atributo na área de estudos do MS foi de 40%.

Os dados com menor variabilidade espacial foram os dados de produtividade de soja. O conjunto de dados com maior variabilidade espacial (CV=30%) foi o de produtividade de trigo 2011, justamente os dados referentes ao mapa que apresentou as “manchas” mais nítidas na Figura 11. Entende-se que, o mapa de trigo 2011 apresenta variabilidade espacial com potencial para ser manejada em UGD, no entanto a variabilidade espacial não apresenta consistência temporal com os outros atributos. Stafford et al. (1996) enfatizam resultados de baixa consistência entre mapas de produtividade de um ano para outro e destes com os atributos de solo e Shepers et al (2004), ao encontrarem repetitividade temporal em apenas três mapas de produtividade do total de cinco, consideram que a falta de repetitividade pode ser fator restritivo ao uso de UGD.

Na área de estudos da região sul onde foram implantados experimentos em 2014 a dispersão dos dados de produtividade em foi baixa (CV=16%) e acompanha a tendência de baixa variabilidade espacial da maioria dos dados de produtividade do talhão onde foram implantados experimentos no ano de 2013 (Figura 15).

Os dados de CE do solo em duas profundidades diferentes (0 – 30 cm e 30 – 90 cm) apresentaram maior variabilidade espacial comparativamente à produtividade (Figura 16).

Figura 15 - Distribuição dos dados de produtividade de milho 2011 referente à área de estudo na região Sul do Brasil (PR) estudada no ano de 2014

Figura 16 - Distribuição dos dados de CE do solo nas camadas de profundidade de 0 a 30 cm e 30 a 90 cm referentes à área de estudo na região Sul do Brasil (PR) estudada no ano de 2014

O CV da CE do solo na profundidade de 0-30 cm foi de 27% enquanto na profundidade de 30-90 cm foi de 24%. Embora a CE tenha apresentado alto CV, os valores reais da CE foram baixos, com média de 4,0 mS m⁻¹ na camada superficial (0 – 30 cm) e 7,0 mS m⁻¹ na camada mais profunda (30 – 90 cm).

As matrizes de correlação de mapas e a análise dos gráficos de distribuição dos dados apresentado até aqui vêm a suportar o entendimento da formação de UGD por dois métodos diferentes de agrupamentos.

Ao aplicar o método de definição de UGD proposto por Molin (2002) ao conjunto de dados da região Sul, talhão estudado em 2013 (Figura 17, a) é possível observar pequenas regiões do talhão com potencial de desempenho diferente entre si, porém as mesmas “manchas” não foram observadas quando aplicado o método de delimitação de UGD por agrupamentos “*k-mean*” (Figura 17, b). Tão pouco foi possível observar “manchas” na imagem de satélite do mesmo talhão (Figura 17, c). Logo, uso de um grande número variáveis para a definição de UGD não necessariamente melhora o resultado da técnica, como evidenciado pelo estudo de Khosla et al. (2008).

A mesma tendência de inconsistência entre os métodos de delimitação de UGD pôde ser observada na Figura 18 referente ao talhão utilizado no estudo em 2014.

Figura 17 - Mapas de UGD resultante de diferentes métodos. (a) UGD delimitada com base no histórico de mapas normalizados; (b) delimitação das UGD com base no método de agrupamentos “k-mean”; (c) imagem de satélite do talhão de estudo. Região sul do Brasil (PR). Área experimental utilizada no ano 2013.

Figura 18 - Mapas de UGD resultante de diferentes métodos. (a) UGD delimitada com base no histórico de mapas normalizados; (b) delimitação das UGD com base no método de agrupamentos “k-mean”; (c) imagem de satélite do talhão de estudo. Região Sul do Brasil (PR). Área experimental utilizada no ano 2014.

Ortega e Santibanez (2007) concluíram que em 77% dos casos, as UGD resultantes de diferentes métodos foram similares e incapazes de discriminar os níveis de produtividade. Os autores testaram três métodos diferentes (análise de agrupamentos, análise de componentes principais e análise de coeficiente de variação).

É provável que a dificuldade de delimitar as UGD para os talhões da região Sul do Brasil, utilizados nessa pesquisa, decorre da baixa variabilidade espacial e inconsistência temporal da variabilidade. A baixa variabilidade pode ter sido um dos fatores que impactou

nos resultados pouco conclusivos dos experimentos com diferentes níveis de populações de plantas aplicadas às UGD.

A existência de UGD consistentes é a base para tomada de decisão de qualquer estratégia de gestão diferenciada da lavoura que visa à aplicação de insumos em taxas variáveis. Do contrário, incorre-se no risco de obter respostas inconclusivas a respeito da estratégia de manejo adotada.

A definição de UGD que façam sentido prático e que permita ao produtor obter melhores rendimentos manejando-as individualmente não tem se mostrado uma tarefa simples. De acordo com os métodos testados e com os campos analisados é difícil estabelecer um padrão tanto para a definição das UGD quanto para o manejo a ser adotado. Para que os produtores adotem a estratégia de UGD é preciso que o seu processo de delimitação seja simples, prático e que garanta ao produtor vantagem relativa à estratégia que ele vem adotando.

De acordo com Ortega e Santibanez (2007) o fator causador da variabilidade é mais importante que o método em si. Logo, a necessidade de investigar mais a fundo os fatores causadores da variabilidade e entender os limitantes de cada talhão tornaria o processo de definição de UGD mais específico e desafia generalizações ou simplificações.

Esses resultados suportam a conclusão de que quando a variabilidade das áreas de cultivo é consistente, o método não tem grande influência na formação das UGD. De outro lado, quando a variabilidade não é evidente ou facilmente percebida, mesmo aos nossos olhos, sendo necessário empregar métodos robustos para estratificar as UGD, significa que a variabilidade é menos expressiva e, provavelmente, inviável de ser manejada com estratégias de gestão diferenciada. Ainda, o método mais robusto e mais complexo, “*K-means*”, nesse caso, produziu resultado inferior ao método da média normalizada.

4.2 Caracterização dos experimentos em faixas e ambientes de estudo

Depois de definidas as UGD, foram alocados experimentos em faixas longas com diferentes híbridos de milho e cinco níveis de população de plantas de modo a contemplar os ambientes de diferente potencial de desempenho expressos nas UGD.

Na Figura 19 é apresentada a alocação das faixas no talhão de estudos na região Centro-Oeste, e na Figura 20 é apresentada a alocação das faixas nos talhões de estudo na região Sul.

Figura 19 - Faixas de híbridos de milho cultivados ao longo das UGD em cinco níveis de população relativas à média usual na região Centro-Oeste (MS) para a segunda safra de verão (população usual = 55000 pl ha⁻¹).

Os experimentos em faixas foram repetidos ao longo de três anos no mesmo talhão em ambiente tropical ao sul da região Centro-Oeste do Brasil. Os experimentos foram conduzidos durante a segunda safra de verão (safrinha) nos anos de 2013, 2014 e 2015 no município de Maracajú – MS.

Nos talhões da região Sul analisados, foram identificados diversos fatores limitantes para a condução e implantação dos experimentos em faixas. Tem destaque a variabilidade espacial dispersa na área, o trajeto das máquinas durante a operação de semeadura e colheita, o relevo, o comprimento das passadas que em alguns lugares do talhão podem chegar a 1400 m e disponibilidade de sementes para representar talhões com tamanha extensão. Dadas estas

condições, nem sempre foi possível representar todas as UGD ao longo da mesma faixa de população fixa Figura 20.

Figura 20 - Faixas de híbridos de milho cultivados ao longo das UGD em cinco níveis de população relativas à média usual na região Sul para a safra de verão (100% = 77000 pl ha⁻¹).

Não foram identificadas UGD aglomeradas como no talhão analisado na região Centro-Oeste e a maneira como as UGD estão distribuídas ao longo do talhão dificultou implantar os experimentos em faixas de maneira que representassem todas as três UGD. No ano de 2013, primeiro ano de experimentos, optou-se por variar a população de plantas ao longo das faixas. No sentido de prevenir a interferência dos processos mecanizados de semeadura e colheita ao longo das faixas, foi utilizada baixa velocidade de operação (1,25 m s⁻¹) e descartados os dados na região de transição entre as parcelas.

A segunda safra de verão é caracterizada por ter um maior risco climático quando comparada à safra normal de verão, especialmente riscos de redução de produtividade em consequência de períodos de déficit hídrico. No entanto, para os anos de 2013 e 2014 foram registrados índices pluviométricos acima da média histórica dos últimos 20 anos. No ano de 2015, os índices pluviométricos ficaram abaixo da média histórica, especificamente no mês de março, quando a cultura estava em estádios iniciais de desenvolvimento, e também no mês de junho, quando a cultura estava em estágio reprodutivo (R2, R3). A condição de estresse hídrico pode ter sido um dos fatores que afetaram negativamente a produtividade da cultura em 2015 (Figura 21).

Figura 21 - Precipitação pluviométrica mensal para os anos de 2013, 2014, 2015 e média dos últimos 20 anos para a região de Maracajú – MS. Fonte: INMET, 2015.

O volume de chuva acumulado ao longo do ciclo da cultura do milho em 2013 foi de 909 mm, no ano de 2014 foi de 866 mm e em 2015 o acumulado foi de 736 mm. A boa disponibilidade hídrica e ausência de outras intempéries como geadas ou ventos, caracterizou um cenário com boas condições para o desenvolvimento da cultura do milho de segunda safra de verão nos anos de 2013 e 2014 na região de Maracajú (MS).

A safra de verão na região Sul é caracterizada por propiciar condições climáticas ótimas ao bom desenvolvimento da cultura do milho. No entanto, para os dois anos agrícolas 2012/2013 e 2013/2014 foram registrados índices pluviométricos abaixo da média histórica dos últimos 20 anos (Figura 22). O acumulado médio nos últimos 20 anos ao longo do período de desenvolvimento da cultura (outubro a março) foi de 1101 mm e o acumulado desses meses no ano agrícola 2012/2013 foi de 894 mm, já o acumulado no ano agrícola 2013/2014 foi de 688 mm (INMET, 2016).

Figura 22 - Precipitação pluviométrica mensal para os anos agrícolas 2012/2013, 2013/2014 e média dos últimos 20 anos para a região de Pirai do Sul – PR. Fonte: INMET, 2016

O experimento realizado na safra 2012/2013 na região Sul foi negativamente afetado por fortes ventos e chuva torrencial dias antes da colheita. Essas condições climáticas adversas acarretaram quebramento e acamamento das plantas de milho levando a perda do experimento. Constatou-se que as perdas foram maiores para os híbridos de ciclo precoce e altas populações (Figura 23).

Figura 23 - Visão parcial do campo experimental no momento da colheita (a) quebramento de plantas. (b) impacto em híbridos de ciclo precoce e altas taxas de população de plantas por unidade de área. Região Sul (PR).

4.3 Distribuição de plantas

Foram analisados 13730 dados de espaçamentos entre plantas de milho ao longo dos três anos de experimentos no MS. Os dados foram manualmente coletados para avaliar a qualidade da distribuição das plantas ao longo da linha de semeadura e também para aferir a população real de plantas presente na área.

Os espaçamentos entre plantas foram classificados em espaçamentos aceitáveis, falhas e múltiplas, conforme parâmetros estabelecidos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (1989).

A distribuição dos espaçamentos está apresentada nas Figuras 24, 25 e 26 para os anos de 2013, 2014 e 2015, nessa mesma ordem. Os espaçamentos estão estratificados para cada nível de população de plantas testado independente das UGD.

Figura 24 - Frequência de espaçamento longitudinal entre plantas de milho para os diferentes níveis de população relativa (60%, 80%, 100%, 120% e 140% da média praticada na região) no ano 2013. Região Centro-Oeste – MS.

Figura 25 - Frequência de espaçamento longitudinal entre plantas de milho para os diferentes níveis de população relativa (60%, 80%, 100%, 120% e 140% da média praticada na região) no ano 2014. Região Centro-Oeste – MS.

Figura 26 - Frequência de espaçamento longitudinal entre plantas de milho para os diferentes níveis de população relativa (60%, 80%, 100%, 120% e 140% da média praticada na região) no ano 2015. Região Centro-Oeste – MS.

Os intervalos sinalizados como mais ou menos um desvio padrão (± 1 DP) para cada uma das médias permitem o entendimento da distribuição dos dados em torno da média. 68% dos dados estão entre o intervalo de ± 1 DP. Esses intervalos são mais restritivos do que os definidos estabelecidos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (1989). À direita dos intervalos de $+ 1$ DP está representada a frequência de falhas, enquanto à esquerda dos intervalos de $- 1$ DP está representada a frequência de plantas múltiplas. Logo, foi observado um maior número de falhas do que plantas múltiplas, independentemente do nível de população de plantas testado.

No ano de 2013 e 2014 a média esteve próxima da mediana e indica uma distribuição simétrica dos dados. No ano de 2015 a média está deslocada para a direita, da mediana, indicando que a média foi influenciada pelo maior número de falhas no ano de 2015 comparativamente a 2013 e 2014.

O resumo do número de falhas, plantas múltiplas, espaçamentos aceitáveis e coeficiente de variação (CV) é apresentado na tabela 7 para cada nível de população de plantas e ano em que os experimentos foram realizados.

Tabela 7 - Percentual de falhas, espaçamentos múltiplos, espaçamentos aceitáveis e coeficiente de variação (CV) dos espaçamentos para os cinco diferentes níveis de população testados nos anos de 2013, 2014 e 2015. Dados de quatro híbridos e três repetições em 2013 e 2014, e três híbridos e três repetições em 2015. Região Centro-Oeste – MS.

População de plantas relativa (%)	60	80	100	120	140	Média
2013						
Falhas (%)	5	6	6	7	10	7
Múltiplas (%)	3	4	5	6	7	5
Espaçamento aceitável (%)	93	89	89	87	83	88
CV (%)	30	32	37	36	46	36
N	1296	1296	1296	1296	1296	1296
2014						
Falhas (%)	6	7	10	9	13	9
Múltiplas (%)	4	6	6	5	9	6
Espaçamento aceitável (%)	90	86	83	86	78	85
CV (%)	33	38	41	38	44	39
N	870	870	870	870	870	870
2015						
Falhas (%)	9	10	11	11	14	11
Múltiplas (%)	3	4	4	4	4	4
Espaçamento aceitável (%)	88	86	85	85	82	85
CV (%)	33	37	41	41	46	40
N	580	580	580	580	580	580

O ano de 2013 foi o ano que resultou no menor CV dos espaçamentos entre os três anos de experimentos, 36%. Destaca-se a velocidade de semeadura de $1,5 \text{ m s}^{-1}$. MAHL et al. (2004) concluíram que a distribuição de plantas não tiveram diferença significativa entre as velocidades de semeadura de $1,2$ e $1,7 \text{ m s}^{-1}$. No entanto, as perdas devido à má distribuição de plantas podem chegar a 83 kg ha^{-1} a cada 10% de incremento no CV dos espaçamentos entre plantas mensurado em campo (SANGOI et al., 2013).

A maior variação nos dados de 2015 (CV = 40%) se deve aos danos causados por porcos que destruíram parte do experimento e afetaram o estande de plantas levando ao aumento no número de espaçamentos falhos. Portanto, o incremento de falhas e incremento no CV dos espaçamentos entre plantas observados em 2015 foi decorrente de um fator externo e não pode ser atribuído à má qualidade da operação de semeadura.

O montante de espaçamentos classificados em aceitáveis ficou em 90% na média dos três anos para o nível mais baixo de população de plantas (60% de plantas em relação à média praticada na região). Quando testado o nível de população de plantas de 140% da média praticada na região, o montante de espaçamentos aceitáveis reduziu para 81%. A redução média de espaçamentos aceitáveis entre a menor e a maior população testada foi de 2,25% a cada aumento de 10000 pl ha^{-1} (Figura 27).

Figura 27- Percentual de falhas, plantas múltiplas, espaçamentos aceitáveis e coeficiente de variação (CV). Percentual médio para os três anos de experimentos (2013, 2014 e 2015). Número total de observações N=13730. Médias de sete híbridos e três repetições. Região Centro-Oeste – MS.

Na média dos três anos, o CV dos espaçamentos foi de 32% para o nível mais baixo de população de plantas e de 45% para o nível de maior população de plantas por área. Isso equivale a um incremento médio de 3,25% no CV para cada aumento de 10000 pl ha⁻¹. Observa-se, portanto, que a qualidade da distribuição de plantas diminui conforme aumenta a população de plantas.

Variabilidades espaciais moderadas não afetam o rendimento de grãos de milho por área porque a redução da produtividade em plantas dominadas pode ser compensada pelo incremento no rendimento dos indivíduos que não sofreram o estresse da aglomeração (TOLLENAAR *et al.*, 2006). No entanto, para KOLLING (2015), a estratégia adotada pelas plantas para compensar a redução da produção via incremento da massa de grãos, é insuficiente para compensar as perdas no rendimento de grãos decorrentes da não uniformidade de distribuição de plantas. Segundo esse último autor, a produtividade de milho reduz de 37 kg ha⁻¹ a 123 kg ha⁻¹ para cada 10% de incremento no CV da distribuição de plantas (KOLLING, 2015). Aplicando o pior cenário para os dados obtidos nessa pesquisa, a perda em produtividade decorrente da distribuição de plantas pode chegar a 150 kg ha⁻¹ entre as populações extremas utilizadas nesse estudo, o que não prejudica a interpretação dos resultados obtidos.

A população média alcançada em cada experimento é apresentada na Figura 28. Observa-se uma pequena diferença entre as médias das populações de plantas mensuradas nas diferentes UGD. No experimento de 2014 a diferença foi de apenas 49 pl ha⁻¹ e no experimento de 2013 a diferença foi de 409 pl ha⁻¹, refletindo a alta consistência dos dados obtidos entre as UGD. Em 2015 a diferença foi de 3491 pl ha⁻¹.

Figura 28 - População de plantas atingida (média) por unidade de gestão diferenciada (UGD) nos anos de 2013, 2014 e 2015. Média de quatro híbridos e três repetições em 2013 e 2014, e três híbridos e três repetições em 2015. Região Centro-Oeste – MS.

Os dados do ano de 2015 refletem os danos causados pelo ataque de porcos, especialmente na UGD de alto desempenho, onde houve redução na população de plantas. Apesar disso, o efeito da diferença na população de plantas final entre as UGD é minimizado ao utilizar a resposta de produtividade para o valor real mensurado no campo ao invés da resposta para as variáveis categóricas de população relativa.

Na Figura 29 é apresentada a população real atingida para cada nível de população relativa almejado. Devido à maior influência de valores extremos sobre a média, optou-se por utilizar o valor da mediana para representar a população mensurada em cada tratamento.

Figura 29 - População de plantas atingida (mediana) por nível de população relativa (60%, 80%, 100%, 120% e 140% da média praticada na região) ao longo dos anos de 2013, 2014, 2015 e estratificada por unidade de gestão diferenciada (UGD). Valores de quatro híbridos e três repetições em 2013 e 2014, e três híbridos e três repetições em 2015. Região Centro-Oeste – MS.

Foi possível discriminar cinco níveis de população real para avaliar a resposta de produtividade nas UGD. De maneira geral, as populações de plantas não diferiram entre as UGD de alto e baixo desempenho o que permite um bom padrão de comparação da resposta de produtividade entre UGD. O intervalo médio entre as níveis de populações testados foi de 9587 pl ha⁻¹, muito próximo do intervalo de 10000 pl ha⁻¹ que havia sido planejado.

4.4 Resposta das UGD à variação de população de plantas na região Centro-Oeste

A análise de variância identificou diferença significativa ($P < 0.05$) para interação tripla entre híbridos, população e UGD nos três anos que foram conduzidos os experimentos. A UGD de alto desempenho teve produtividade média superior à UGD de baixo desempenho nos três anos em que os experimentos foram conduzidos Figura 30. Na sequência procedeu-se a análise estratificada dentro de cada UGD para híbridos e população.

A maior diferença de produtividade média entre as UGD, independente de híbrido ou população, foi de 862 kg ha⁻¹ no ano 2013. A UGD de transição não foi analisada em função de sua baixa representatividade e do baixo número de pontos amostrados nessa UGD.

Figura 30 - Produtividade de milho nas unidades de gestão diferenciadas (UGD de alto desempenho; UGD de baixo desempenho) em cultivo de segunda safra de verão (safrinha de milho) no MS ao longo dos anos 2013, 2014 e 2015. Dados de quatro híbridos e três repetições em 2013 e 2014, e três híbridos e três repetições em 2015. Região Centro-Oeste – MS.

Ao analisar conjuntamente os dados de produtividade e população de plantas para cada UGD é possível observar tendência positiva entre aumento de população e produtividade. Tal resultado corrobora com o exposto por Fancelli e Dourado-Neto (2003) ao afirmarem que o comportamento da produtividade é linear e positivo quando associado à população de plantas até um máximo denominado “ponto crítico”, acima do qual a produção decresce. Essa mesma tendência entre produtividade e população de plantas de milho foi defendida por Tollenaar (1992), Sangoi et al. (2002) e Heiniger (2010).

Regressões foram ajustadas para modelar o desempenho das UGD em função da variação da população de plantas por área Figura 31. O melhor modelo ajustado para população e produtividade foi quadrático, independente do ano ou da UGD estudada.

Figura 31- Efeito da população de plantas na produtividade de milho para as diferentes unidades de gestão (UGD de alto desempenho; UGD de baixo desempenho) em cultivo de segunda safra de verão (safrinha) no MS ao longo dos anos 2013, 2014 e 2015. Dados de quatro híbridos e três repetições em 2013 e 2014, e três híbridos e três repetições em 2015. Região Centro-Oeste – MS.

O efeito das UGD foi mais evidente à medida que se aumenta a população de plantas. Quando utilizadas populações baixas, 33000 pl ha⁻¹ (40% abaixo do recomendado para a região do MS) a diferença entre as UGD não foi significativa. Essa tendência de comportamento aparece nos três anos em que os experimentos foram conduzidos.

Ademais, nos anos nos quais a média de produtividade do talhão é maior, a diferença entre as UGD se acentua. À medida que alguma condição restringe a produtividade, a diferença entre as UGD é suavizada, especialmente nas populações mais baixas.

Destaca-se também que, quando o ambiente é mais restritivo à produtividade, o intervalo de população que maximiza a produtividade é mais estreito e o produtor precisa ser mais assertivo quanto ao número de plantas por área para obter o melhor rendimento, sob pena de perda de produtividade.

No ano de 2013, a diferença de produtividade entre as UGD foi de 836 kg ha⁻¹ na população mais alta e de 501 kg ha⁻¹ na população mais baixa. Esse efeito pode ser explicado pelo fato do aumento no número de plantas por área aumentar a demanda por recursos naturais, água, luz e nutrientes. Quando a competição entre plantas é maior (maior número de plantas por área) a UGD de alto desempenho propicia tetos produtivos maiores que a UGD de baixo desempenho. Já quando se reduz o número de plantas por hectare, reduz também a competição entre plantas e a produtividade não difere estatisticamente entre UGD.

Os resultados obtidos mostram que o ponto de produtividade máxima esteve sempre acima da população comumente utilizada pelos produtores na região do MS. A tendência de aumento de produtividade com o aumento da população foi similar entre as UGD, embora as médias de produtividade da UGD de alto desempenho tenham sido maiores.

As máximas produtividades foram atingidas entre populações de 70000 pl ha⁻¹ e 80000 pl ha⁻¹, sendo que a produtividade decresce nas populações acima desse limite. Ou seja, a faixa de população de plantas onde a produtividade foi máxima está, pelo menos, 27% acima das 55000 pl ha⁻¹ normalmente utilizadas pelos produtores da região onde o estudo foi realizado. No entanto, é fundamental considerar que existe a possibilidade de populações mais baixas desempenharem melhor em anos mais restritivos, principalmente quanto ao volume de chuvas.

Esses resultados são um contraponto aos apresentados por Horbe et al. (2013). No ambiente da região Sul do Brasil foi possível reduzir em até 29% a população de plantas por área em relação à população padrão usada na região (70000 pl ha⁻¹) e com isso aumentar a produtividade em até 1900 kg ha⁻¹ em áreas de gestão de baixo desempenho (HORBE et al. 2013). Já a tendência para as UGD de alto desempenho é a mesma entre os dois estudos, aumento de população concomitante ao aumento de produtividade.

4.5 Resposta das UGD à variação de população de plantas na região Sul

Apesar dos prejuízos ao experimento, a abordagem dos resultados da safra 2012/2013 na região Sul evidencia os riscos intrínsecos ao uso de altas populações. Na Figura 32 são apresentados os dados de produtividade coletados durante a colheita mecanizada comparativamente a estimativa de produtividade feita pela colheita manual.

Figura 32 - Efeito da população de plantas na produtividade de milho sob colheita mecanizada comparativamente à produtividade estimada pela colheita manual. Região Sul (PR). Cada ponto de colheita manual representa a média de um híbrido (2 UGD x 3 repetições). Pontos de colheita mecanizada representam a média de diversos pontos coletados pelo sensor embarcado na colhedora (2 UGD x 3 repetições). As linhas sólidas representam a curva ajustada para o conjunto de pontos.

Dadas às condições de campo em que o experimento foi conduzido e o tamanho das faixas é difícil eliminar o efeito da variabilidade do ambiente com amostras coletadas manualmente. Entretanto, a amostragem manual permitiu retratar o efeito da população de plantas sob a produtividade de milho sem a influência das perdas decorrentes das intempéries climáticas. Nesse caso, foram obtidos ajustes quadráticos que melhor representam o efeito da população de plantas sobre a produtividade de milho.

Destaca-se que devido ao tombamento das plantas a colhedora é pouco eficiente em colher as plantas tombadas o que resulta nas baixas produtividades registradas durante a colheita mecanizada nessas condições. Isso não significa, no entanto, que as plantas tenham produzido o que a colhedora registrou, mas de fato, o montante colhido é o que vai efetivamente remunerar o produtor. Para estimar a produtividade sem o efeito do tombamento foi realizada a colheita manual.

A produtividade registrada pelo sensor da colhedora foi, em média, 42% menor que a produtividade obtida pela colheita manual. Populações de plantas de 99000 pl ha⁻¹ tiveram perdas de produtividade de 54% enquanto que em populações menores, 44000 pl ha⁻¹, as perdas foram de 23%. É preciso levar em conta os riscos de perdas de rendimento por

quebramento quando utilizado altas populações de plantas. Existe um limiar estreito entre ganhos de rendimento e perdas em produtividade. Cabe salientar ainda que o período de colheita torna-se mais crítico com o uso de altos níveis de população de plantas por área.

No experimento realizado no ano agrícola 2013/2014 a produtividade média, independente de UGD, foi de 11170 kg ha^{-1} , sendo a produtividade média dos três anos no talhão testado no MS de 7290 kg ha^{-1} , o que significa diferença média de 3880 kg ha^{-1} entre a produtividade dos talhões nas duas diferentes regiões de estudo. A análise estratificada para as UGD revela que a UGD classificada como a de baixo potencial de desempenho foi a que teve a maior média de produtividade, seguida da região de transição e UGD de alto potencial (Figura 33). Destaca-se a baixa representatividade da UGD de baixa produtividade onde foram coletados apenas 394 pontos amostrais enquanto nas outras UGD foram coletados mais de 3000 pontos.

Figura 33 - Produtividade de milho nas unidades de gestão diferenciadas (UGD de alto desempenho; UGD de transição e UGD de baixo desempenho) em cultivo de verão na região Sul do Brasil – PR. Ano agrícola 2013/2014.

Em função da baixa variabilidade espacial, a média de produtividade entre as UGD não diferiu estatisticamente. A diferença média de produtividade entre a UGD de baixo desempenho e a região de transição foi de 376 kg ha^{-1} (3,3% em relação à média do talhão) enquanto que a diferença de produtividade entre a região de transição e a UGD de alto desempenho foi de 372 kg ha^{-1} (3,3% em relação à média do talhão). Na UGD de baixo desempenho e região de transição o CV foi o mesmo, 10,8%, e na UGD de alto desempenho o CV foi 12,8%. Cabe salientar que o CV das UGD foi baixo comparativamente ao CV obtido

no talhão analisado para a região Centro-Oeste que variou de 18% a 23%, dependendo do ano e da UGD.

Ao analisar conjuntamente os dados de produtividade para os níveis de população de plantas testados nas diferentes UGD não foi possível observar resposta de produtividade significativa à variação na população de plantas (Figura 34).

Figura 34 - Efeito da população de plantas na produtividade de milho para as diferentes unidades de gestão (UGD de alto desempenho; UGD de transição) em cultivo de segunda de verão na região Sul – PR. Ano agrícola 2013/2014.

Esses dados corroboram a baixa variabilidade existente nos talhões estudados na região Sul e a baixa resposta da população de plantas às UGD. Possivelmente, a restrição hídrica na safra 2013/2014 pode ter afetado negativamente a produtividade da cultura do milho, sobretudo nas populações mais adensadas. O volume de chuva acumulado na safra 2013/2014 foi de 688 mm, 206 mm a menos que no ano anterior, o que pode ter contribuído para a baixa resposta de produtividade em função do incremento de população de plantas por área, sendo que a produtividade das populações mais baixas é equiparada às produtividades obtidas nas mesmas populações na safra anterior.

Na sequência, foi analisado o desempenho de cada híbrido de milho em cinco níveis de população de plantas para cada UGD.

4.6 Resposta dos híbridos à população e ao ambiente (UGD)

Regressões foram ajustadas para modelar o desempenho dos híbridos nas UGD em função da variação da população de plantas por área (Figura 35, Figura 36 e Figura 37). O melhor modelo ajustado para híbridos e população foi quadrático, independente do ano ou da UGD estudada. Ajustes quadráticos e coeficientes de determinação significativos para incremento de população e produtividade de milho também são apresentados por Sangoi et al. (2006), Shanahan et al. (2004), Tokatlidis; Koutroubas (2004), Sangoi et al, (2002) e Duvick (1997).

Figura 35 - Efeito da população de plantas na produtividade de híbridos de milho em diferentes unidades de gestão (UGD de alto desempenho; UGD de baixo desempenho). Cultivo de segunda safra de verão (safrinha) na região Centro-Oeste – MS no ano 2013.

As populações mais altas utilizadas, 40% acima da população recomendada para a região, nem sempre foram suficientes para alcançar o ponto de inflexão da curva onde a produtividade é maximizada. Ou seja, de acordo com os parâmetros estimados nos modelos

regressão quadrática, o máximo valor no eixo “x” (plantas ha^{-1}) combinado com o máximo valor no eixo “Y” (kg ha^{-1}) nem sempre ficou dentro dos valores testados. Quando o ponto de produtividade máxima é atingido, é possível inferir que determinado híbrido tem uma população de plantas máxima na qual a produção por área é maximizada; a partir desse ponto a produtividade passa a reduzir mesmo com o aumento da população de plantas por área.

Para os híbridos onde o ponto de máxima produtividade foi atingido, verificou-se que a população de plantas onde a produtividade foi maximizada é maior na UGD de alto desempenho comparativamente à UGD de baixo desempenho.

A produtividade máxima alcançada na UGD de alto desempenho foi de 10175 kg ha^{-1} pelo híbrido AG8500 na população de 78548 pl ha^{-1} . No entanto, na mesma população na UGD de baixo desempenho, a produtividade do híbrido foi de 9230 kg ha^{-1} . A máxima produtividade deste mesmo genótipo em área de baixo desempenho foi de 9281 kg ha^{-1} na população de 74806 pl ha^{-1} . Com tendência similar, o híbrido AG9030 teve máxima produtividade, 9374 kg ha^{-1} na máxima população testada que foi 83333 pl ha^{-1} na UGD de alto desempenho, na UGD de baixo desempenho a produtividade máxima de 7997 kg ha^{-1} foi obtida na população de 77860 pl ha^{-1} .

Nesse cenário, a diferença de população entre UGD foi de $3742 \text{ plantas ha}^{-1}$ a mais na UGD de alto desempenho para o híbrido AG8500 e de $5473 \text{ plantas por ha}^{-1}$ para o AG9030. A diferença de produtividade foi de 894 kg ha^{-1} a mais na UGD de alto desempenho para o híbrido AG8500 e de 1377 kg ha^{-1} para o híbrido AG9030.

Esses resultados corroboram com Shanahan et al. (2004) que concluíram que a população ótima pode variar até 5000 pl ha^{-1} entre UGD de alto e baixo desempenho nas condições do leste do Colorado. Difere de Abendroth e Elmore (2007) que por sua vez sustentam que a população ideal pode variar até $\pm 12000 \text{ pl ha}^{-1}$.

Destaca-se ainda, que a diferença em produtividade entre UGD foi observada também nas populações mais baixas onde a competição entre plantas é mínima. A diferença de produtividade entre as UGD na menor população testada foi de 504 kg ha^{-1} a mais na UGD de alto desempenho para o híbrido AG8500, e 360 kg ha^{-1} para o híbrido AG9030. Esse resultado indica que os genótipos respondem de maneira diferente ao ambiente e à população de plantas.

O híbrido com maior incremento de produtividade foi o AG8500 com 3315 kg ha^{-1} de diferença entre a população mínima e a máxima, o que faz desse genótipo o mais responsivo ao aumento de plantas dentre os genótipos testados em 2013. O menor incremento foi o do híbrido 30A37 com 1960 kg ha^{-1} , sendo esse o híbrido com maior produtividade nas

populações baixas, mas apresentou ser menos responsivo ao aumento na população de plantas quando comparado aos híbridos AG8500 e AG9030.

A produtividade média no ano de 2014 foi menor que em 2013. Destaca-se uma redução em produtividade maior na UGD de alto desempenho comparativamente à UGD de baixo desempenho.

No ano de 2014 foi possível atingir o ponto de produtividade máxima para todos os híbridos testados nas duas UGD, tanto de alto como de baixo desempenho (Figura 36).

Figura 36 - Efeito da população de plantas na produtividade de híbridos de milho em diferentes unidades de gestão (UGD de alto desempenho; UGD de baixo desempenho). Cultivo de segunda safra de verão (safrinha) na região Centro-Oeste – MS no ano 2014.

As populações nas quais foram atingidas produtividade máxima na UGD de alto desempenho no ano de 2014 foram 71836 pl ha⁻¹, 70510 pl ha⁻¹, 70183 pl ha⁻¹ e 67816 pl ha⁻¹ para a sequência dos híbridos AG9040, DKB285, AG9030 e AG8500. As que permitiram produtividade máxima foram maiores na UGD de alto desempenho comparativamente à de baixo desempenho para todos os híbridos.

Os modelos ajustados pela análise de regressão ficaram parecidos entre as UGD. As principais diferenças em produtividade são observadas nas populações mais altas, próximas a 70000 pl ha⁻¹. Nas populações abaixo de 50000 pl ha⁻¹ apenas as médias do híbrido AG9030 diferiram estatisticamente entre UGD ($P < 0.05$), para os demais híbridos o teste de média não identificou diferenças de produtividade significativas entre UGD nos níveis de população

abaixo de 50000 pl ha⁻¹. Ou seja, em baixas populações a produtividade das UGD não diferem estatisticamente para os híbridos AG9040, DKB285 e AG8500.

O incremento linear em produtividade na transição dos níveis de população que estão abaixo do recomendado indica baixa capacidade dos genótipos testados em compensar os espaços de solo sem planta com uma maior produção por planta, ou seja, a produtividade aumenta quase que na mesma proporção do aumento no número de plantas.

Devido à menor produção por planta em híbridos modernos, o aumento de produtividade se deve ao incremento na população e não ao aumento na produção por planta (TOKATLIDIS; KOUTROUBAS, 2004). Já a tolerância às restrições do ambiente, incluindo a condição de elevado número de plantas por área, pode ser expressa pelas plantas quando essas produzem menos por planta sem reduzir a produção por área (TOLLENAAR; LEE, 2002). Nesse sentido, é esperado que alguns híbridos tolerem mais o aumento na população de plantas que outros, conforme pode ser observado nas Figuras 35 e 36.

Os resultados dos experimentos realizados em 2015 foram comprometidos após ataque de porcos e também devido a restrições hídricas. Esses dois fatores comprometeram o estande final de plantas bem como a produtividade dos híbridos, levando a resultados pouco conclusivos do experimento realizado em 2015 (Figura 37).

Figura 37- Efeito da população de plantas na produtividade de híbridos de milho em diferentes unidades de gestão (UGD de alto desempenho; UGD de baixo desempenho). Cultivo de segunda safra de verão (safrinha) na região Centro-Oeste – MS no ano 2015.

Nas Figuras 38 e 39 são apresentados os testes de médias para a produtividade dos híbridos dentro de cada nível de população de plantas.

Os híbridos mais produtivos na UGD de alto desempenho foram AG8500, 30A37, AG9040 e AG9030 com médias de 8857, 8735, 7954 e 7730 kg ha⁻¹. Na UGD de baixo desempenho, os híbridos mais produtivos foram 30A37, AG8500, AG9040 e AG9030, com médias de produtividades de 7979, 7926, 7194 e 6758 kg ha⁻¹.

Figura 38 - Produtividade média dos híbridos de milho comparados dentro de cinco níveis de população de plantas por área (percentual de plantas em relação à média recomendada para a região) em diferentes unidades de gestão diferenciada (UGD de alto desempenho; UGD de baixo desempenho) no cultivo de segunda safra de verão (safrinha) no MS no ano de 2013. Médias seguidas de mesma letra (a, b, c, d) não diferem estatisticamente pelo teste de médias (LSD a 5% de significância) para híbridos dentro da combinação população e UGD. Região Centro-Oeste – MS.

O aumento na população de plantas proporcionou incremento de produtividade de 61% para o híbrido AG9030 na UGD de alto desempenho e de 50% na UGD de baixo desempenho. O híbrido AG8500 teve incremento de 54% na UGD de alto desempenho e de 52% na UGD de baixo desempenho.

A capacidade de cada híbrido de responder ao incremento de população e ao ambiente (UGD) deve ser levada em conta na gestão da variabilidade das lavouras. Shanahan et al. (2004) chegaram a resultados onde o incremento de produtividade em resposta ao aumento no

número de plantas por área foi de 50% em UGD de alto potencial de desempenho e 25% em UGD de baixo potencial de desempenho.

O incremento de produtividade para o híbrido AG9040 foi de 34% na UGD de alto desempenho e 37% na UGD de baixo desempenho. O híbrido 30A37 teve 26,7% de incremento na UGD de alto desempenho e 30% na UGD de baixo desempenho, sendo o híbrido mais estável entre os materiais testados nesse estudo.

A maior tolerância ao estresse causado por populações elevadas é um dos fatores responsáveis pelo aumento em produtividade. A tolerância ao estresse pelo adensamento de plantas é obtida pela seleção de características genéticas que conferem menor tamanho do pendão, arquitetura da copa mais compacta, plantas menores com menos folhas, folhas mais curtas e mais eretas que melhoram a interceptação da radiação solar e inserção mais baixa da espiga, promovendo uma maior resistência ao tombamento de plantas (TOKATLIDIS; KOUTROUBAS, 2004; SANGOI et. al., 2002). Essas características associadas às altas populações possibilitam o melhor aproveitamento da luz solar devido ao maior índice de área foliar presente, principalmente, em estágios vegetativos iniciais (FANCELLI; DOURADO-NETO, 2003; SANGOI, 2000).

No ano de 2014 (Figura 39), as médias de produtividade foram mais baixas comparadas com o ano de 2013. Os híbridos mais produtivos na UGD de alto desempenho foram DKB285, AG9030, AG8500 e AG9040 com médias de 7591, 7431, 7280 e 6997 kg ha⁻¹. Na UGD de baixo desempenho, os híbridos mais produtivos foram DKB285, AG8500, AG9030 e AG9040, com médias de produtividades de 7688, 7569, 6884 e 6713 kg ha⁻¹.

Figura 39 - Produtividade média dos híbridos de milho comparados dentro de cinco níveis de população de plantas por área (percentual de plantas em relação à média recomendada para a região) em diferentes unidades de gestão diferenciada (UGD de alto desempenho; UGD de baixo desempenho) no cultivo de segunda safra de verão (safrinha) no MS no ano de 2014. Médias seguidas de mesma letra (a, b, c, d) não diferem estatisticamente pelo teste de médias (LSD a 5% de significância) para híbridos dentro da combinação população e UGD. . Região Centro-Oeste – MS.

O híbrido AG9040 não apresentou diferença significativa de produtividade para as populações de 49000, 58000 e 68000 pl ha⁻¹ na UGD de alto desempenho, inclusive apresenta ligeira redução entre a população de 58000 e 68000 pl ha⁻¹ o que indica ter atingido a população na qual a produtividade é maximizada. Essa tendência é muito próxima ao que foi observado no ano de 2013.

O aumento na população de plantas proporcionou um incremento de produtividade de 82% para o híbrido AG9030 na UGD de alto desempenho e de 56% na UGD de baixo desempenho. Estes resultados estão, portanto, em linha com os obtidos nos experimentos realizados em 2013, em que os maiores incrementos de produtividade foram observados na UGD de alto rendimento. Já o híbrido AG8500 teve incremento de 48% nas duas UGD, tanto de alto quanto de baixo desempenho.

4.7 Rentabilidade da gestão de população de plantas em UGD

O maior rendimento líquido foi obtido no ano 2013, no qual também foram obtidas as melhores performances de produtividade (Figura 40).

Figura 40 - Efeito da população de plantas sob rendimento líquido para as diferentes unidades de gestão (UGD de alto desempenho; UGD de baixo desempenho) em cultivo de segunda safra de verão (safrinha) no MS ao longo dos anos 2013, 2014 e 2015. Dados de quatro híbridos e três repetições em 2013 e 2014, e três híbridos e três repetições em 2015.

O rendimento líquido está relacionado diretamente ao preço do grão pago ao produtor, aos custos de produção e às condições do ambiente que interferem na produtividade atingida (RICHETTI; CECCON, 2015). Portanto, cabe destacar alguns pressupostos para o cálculo de rentabilidade, entre estes está o valor da saca de sementes de milho híbrido simples geneticamente modificado com a introdução de genes de *Bacillus Thuringiensis* (Bt) no valor de R\$ 310,00 a saca de 60,000 sementes, e o preço do grão pago ao produtor no valor de R\$ 19,00 a saca de 60 kg.

Embora o ambiente exerça papel fundamental no rendimento líquido, nota-se que o ajuste da população de plantas teve impacto importante no rendimento de grãos podendo ser o fator determinante do lucro.

O uso de populações abaixo do recomendado acarretou redução mais expressiva de rendimento comparativamente ao uso de populações acima do recomendado. Essa mesma tendência de queda acentuada no rendimento econômico quando utilizadas populações de

plantas abaixo do recomendado também é defendida por Blake et al. (2003), já os prejuízos de populações acima do recomendado está relacionado ao custo desnecessário com sementes e não necessariamente com redução de produtividade. Destaca-se, portanto, o impacto negativo que o uso de populações abaixo do recomendado pode trazer ao produtor, sendo seu impacto negativo maior que uso de populações acima do recomendado.

A redução de rendimento pode chegar até 34% devido ao uso de estande de plantas mais conservador, até 20% abaixo da população regularmente recomendada. No ano de 2013 a redução foi de 23% (R\$ 240,00 ha⁻¹) na UGD de alto desempenho e 34% (R\$ 268,00 ha⁻¹) na UGD de baixo desempenho. Já no ano de 2014, a redução de rendimento pelo uso de estande de plantas abaixo do recomendado foi de 28% (R\$ 223,00 ha⁻¹) na UGD de alto desempenho e 22% (R\$ 163,00 ha⁻¹) na UGD de baixo desempenho.

A taxa de população que melhor remunerou o produtor esteve acima da população recomendada para a região. O ajuste da população de plantas ótima para cada UGD proporcionou aumento no rendimento líquido quando comparado a população usual. No ano de 2013, o rendimento líquido foi 10% superior na UGD de alto desempenho ao usar a população 20% acima do recomendado, o que equivale ao ganho líquido de mais R\$ 104,00 ha⁻¹. Na UGD de baixo desempenho o rendimento líquido foi 13% superior comparativamente aos rendimentos obtidos com a população usual, o que equivale ao ganho de mais R\$ 101,00 ha⁻¹. No ano de 2014 a população ótima na UGD de alto desempenho (66973 pl ha⁻¹) proporcionou 3% (R\$ 90,00 ha⁻¹) de incremento nesta UGD enquanto a população ótima na UGD de baixo desempenho (63357 pl ha⁻¹) proporcionou 10,8% (R\$ 62,00 ha⁻¹) de incremento nesta UGD comparativamente aos rendimentos obtidos com a população usual.

Considerando o talhão de 74 ha e a proporção de 33% da área de UGD de alto desempenho, 59% de UGD de baixo desempenho e 8 % de UGD de transição, o ganho líquido nesse talhão com o ajuste da população foi de R\$ 7775,00, no ano de 2013, e R\$ 6805,00, no ano de 2014, média de 11,6% de aumento no rendimento líquido.

Os ganhos com os ajustes na população ótima econômica se devem, principalmente, à população referência da região estar quase 20000 pl ha⁻¹ abaixo do ótimo econômico identificado nesse estudo e não necessariamente aos benefícios da STV, já que a população ótima entre UGD difere em 5000 pl ha⁻¹.

Considerando que a participação do insumo semente é 18,8% do total dos custos na segunda safra de milho na região do MS (RICHETTI; CECCON, 2015) foram simulados quatro cenários. Três cenários variam apenas o custo com sementes, R\$ 240,00 R\$ 310,00 e R\$ 400,00 a saca de 60000 sementes, o quarto cenário considera uma redução de R\$ 4,00

reais no preço da saca de 60 kg pago ao produtor e o custo com sementes fixo em R\$ 400,00 (Figura 41).

Figura 41 - Efeito da população de plantas sob o rendimento líquido em três cenários de custo de sementes de milho (R\$ 240,00 R\$ 310,00 R\$ e 400,00 cada saco com 60 mil sementes) e um cenário de preço baixo pago ao produtor (R\$ 15,00 a saca de 60 kg). Cultivo de segunda safra de verão (safrinha) no MS ao longo de três anos 2013, 2014 e 2015. Dados de quatro híbridos e três repetições em 2013 e 2014, e três híbridos e três repetições em 2015.

A população ótima econômica varia em função do custo com o insumo semente e conforme reduz o preço pago ao produtor, maior é a importância da população de plantas para garantir um bom rendimento. O estande com população ótima pode ter até 1545 pl ha⁻¹ a mais no cenário de menor custo de sementes (R\$ 240,00 saco⁻¹) em relação ao cenário de maior custo (R\$ 400,00 saco⁻¹). Sendo que a população ótima no ano de 2013 foi a máxima população testada, 70197 pl ha⁻¹, e a população ótima no ano de 2014 foi 65918 pl ha⁻¹.

Em anos onde a produtividade for mais restrita, como ocorreu no ano de 2015 e 2014, a faixa de população que proporciona o ótimo rendimento é menor se comparada ao ano de 2013 onde o ambiente favoreceu rendimento médio maior.

5 CONCLUSÕES

É possível inferir que a população de plantas ótima pode diferir em até 5743 pl ha⁻¹ entre as diferentes UGD dentro de um mesmo talhão. Ao praticar populações abaixo do recomendado não foi detectada diferença de produtividade entre as UGD em dois dos três anos de experimentos para a segunda safra de verão no MS. Além disso, a população usual praticada na segunda safra de verão na região Centro-Oeste (MS) está aquém da população que proporciona o melhor desempenho dos híbridos testados.

Desta forma, quanto menor a média de produtividade do talhão, mais restritiva é a população ótima. A população de plantas na qual a produtividade é maximizada é mais flexível quando as condições ambientais favorecem altos rendimentos. Nessas condições, variações de até 2000 pl ha⁻¹ podem trazer respostas similares.

Ao adotar a taxa variável de sementes é necessário, portanto, considerar conjuntamente o potencial da UGD, o híbrido e a população de plantas. A resposta do material genético de milho ao aumento de população de plantas é determinante para obtenção de resultados positivos com a utilização de taxas variáveis de sementes.

Quanto à qualidade da distribuição longitudinal, a mesma é prejudicada com o aumento da população de plantas por área, levando ao aumentando da variabilidade dos espaçamentos entre plantas e ao aumento da ocorrência de espaçamentos falhos e plantas múltiplas.

Quanto às UGD, estas apresentaram diferentes níveis de produtividade, CE do solo e concentração de nutrientes no ambiente experimental da região Centro-Oeste, indicando que os procedimentos utilizados nesse estudo para a definição de UGD foram eficientes.

O método de formação de UGD pela média normalizada proporcionou maior homogeneidade interna das UGD comparativamente ao método de “Cluster K-means”. Foi possível, inclusive, discriminar a variabilidade espacial da produtividade e também de atributos de solo (CE, pH, CTC Efetiva, Argila, Areia, V%, M.O., e K) com o uso de mapas históricos de produtividade, mapa de CE do solo na camada superficial (0 – 30 cm) e mapa de altitude para definir UGD na área de estudos na região Centro-Oeste (MS). Nas áreas de estudo na região Sul (PR), as variabilidades espacial e temporal dos dados de produtividade e CE do solo foram baixas e a delimitação de UGD, pouco consistente.

A consistência das variabilidades espacial e temporal presentes no talhão é fundamental para definição das UGD; quando a variabilidade das áreas de cultivo é consistente, o método não exerce grande influência na formação das mesmas. Por outro lado, quando a variabilidade espacial da produtividade da área é baixa ($CV < 25\%$) e é necessário empregar métodos sofisticados para discriminá-la, sugere-se que o nível de variabilidade presente no talhão é sutil e, provavelmente, a adoção de gestão diferenciada em UGD é inviável.

Para que os produtores adotem a estratégia de semeadura em taxas variáveis em UGD é preciso, portanto, que o processo de delimitação das UGD seja simples e prático e que o ajuste local de população de plantas garanta vantagem relativa ao uso da gestão baseada na média da lavoura.

Por fim, é preciso cautela ao fazer generalizações sobre as populações ótimas para a operação em UGD, dadas as vastas possibilidades de interações com o ambiente. Os riscos estão relacionados às variações climáticas, nas quais as altas populações estão mais suscetíveis ao estresse hídrico e a ventos fortes que podem levar ao quebramento e acamamento das plantas impactando, desta forma, negativamente na produção.

REFERÊNCIAS

- ABENDROTH L.; ELMORE, R. **Corn seeding rates and variable-rate seeding**. 2007. Disponível em: <http://www.ipm.iastate.edu/ipm/icm/2007/4-9/seedingrate.html> Acesso em: 01 fev. 2012.
- ANSELM, A. A. **A adoção da agricultura de precisão no Rio Grande do Sul**. 2012. 104p. Dissertação (Mestrado em Agronegócios) – Programa de Pós-Graduação em Agronegócios, Escola de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Semeadora de precisão: ensaio de laboratório/método de ensaio, projeto de norma 12:02.06-004**. Rio de Janeiro: ABNT, 1989. 21p.
- BLAKE, J. J.; SPINK, J. H.; DYER, C. **Factors affecting cereal establishment and its prediction**. London:Home-Grown Cereals Authority, 2003. (Research Review, 51).
- BLACKMORE, S. Developing the principles of Precision Farming. In: **ICETS 2000: Proceedings of the ICETS** (China Agricultural University, Beijing, China), 2000. p. 11-13.
- BLACKMORE, S.; MOORE, M. Remedial Correction of Yield Map Data Remedial Correction of Yield Map Data. **Precision Agriculture**, Silsoe, v.1, p.53–66, 1999.
- BLACKMORE, S.; GODWIN, R.; FOUNTAS, S. The analysis of spatial and temporal trends in yield map data over six years. **Biosystems Engineering**, Silsoe, v.84, n.4, p. 455-466, 2003.
- BREVIK, E.C.; FENTON, T.E. Influence of soil water content, clay, temperature, and carbonate minerals on electrical conductivity readings taken with an EM-38. **Soil Survey Horizons**, Dickinson, v.43, p. 9-13, 2002.
- BULLOCK, D. G.; BULLOCK, D. S.; NAFZIGER, E. D. DOERGE, T. A.; PASZKIEWICZ, S. R.; CARTER, P. R.; PETERSON, T. A. Does variable rate seeding of corn pay. **Agronomy Journal**, Madison, v. 90, p.830-836, 1998.
- CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento de safra brasileira**. Brasília: Conab, 2011. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16_02_04_11_21_34_boletim_graos_fevereiro_2016_ok.pdf>. Acesso em: 02 mar. 2016.

CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO I. A.; DUARTE, A. P. **Milho safrinha**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. EMBRAPA. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/milho/arvore/CONT000fya0krse02wx5ok0pvo4k3mp7ztkf.html> Acesso em: 10 abr. 2012.

KOLLING, D. F. **Estratégias de manejo para mitigar os prejuízos ocasionados ao milho pela variação espacial e temporal na distribuição de plantas na linha de semeadura**. 2015. 142p. Tese (Doutorado na área de) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, Lages, 2015.

DOURADO NETO, D.; FANCELLI, A. L. **Produção de milho**. Guaíba: Agropecuária, 2004. 360p.

DUVICK, D. N. What is yield? In: EDMEADES, G.O, (Ed.). **Developing Drought and Low N-tolerant maize**. El Batan, Mexico: CIMMYT, 1997. p. 332-335.

EHSANI, M. R.; DURAIRAJ, C. D.; WOODS, S.; SULLIVAN, M. Potential Application of Electrical Conductivity (EC) Map for Variable Rate Seeding. **Agricultural Engineering International**, Thallahassee, v.7, Nov., 2005.

RICHETTI, A.; CECCON, G. Viabilidade econômica da cultura do milho safrinha, 2015, em Mato Grosso do Sul. Novembro. Dourados, 2014 Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/112911/1/COT2014196-final-1.pdf>. Acesso em: 02 mar. 2016.

FANCELLI, A.L.; DOURADO-NETO, D. **Milho: estratégias de para alta produtividade**. Piracicaba, 2003. 208p.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Production**. 2010. Disponível em: <<http://faostat3.fao.org/browse/Q/QC/E>>. Acesso em: 2 mar. 2016.

FLOSS, E. L. **Fisiologia das plantas cultivadas**. Passo Fundo: UPF, 2004.536p.

GODWIN, R.J.; KNIGHT, J. P.; TAYLOR, J. C.; WELSH, J. P.; WOOD, G. A.. Precision Farming of Cereal Crops: a Review of a Six Year Experiment to develop Management Guidelines. **Biosystems Engineering**, v. 84, n. 4, p. 375-391, 2003.ISSN 1537-5110.Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S153751100300031X>>.

GRIFFIN, S. J. Assessment of the success of variable rate seeding based on emi maps, In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 10, 2010. Silsoe, Precision Agriculture'10, v.1, Denver, 2010.

HAMMER, G. L.; DONG, Z, MCLEAN, G.; MESSINA, C.; SCHUSSLER, J.; ZINSELMEIER, C.; PASZKIEWICZ, S.; COOPER, M.; Can changes in canopy and/or root system architecture explain historical maize yield trends in the U.S. Corn Belt? **Crop Science**, Madison, v.49, p.299-312, 2009.

HEINIGER, R.W. Variable seeding rates: optimizing yield opportunity and minimizing seed costsIn: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 10. 2010. Denver. **Proceedings**. Denver, 2010. 1CD-ROM

HORBE, T. A. N.; AMADO, T. J. C.; FERREIRA, A. O.; ALBA, P.J. Optimization of Corn Plant Population According to Management Zones in Southern Brazil. **Precision Agriculture**, v.14, p.450–465, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11119-013-9308-7>>.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa**. Brasília: Inmet, 2015. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>> Acesso em: 20 out. 2015.

Instituto Nacional de Meteorologia - INMET. Banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa [online]. [citado 2012 out. 22]. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W **Applied multivariate statistical analysis**. New Jersey: Prentice Hall, 1998. 816p.

KASPAR, T. C.; COLVIN, T. S.; JAYNES, D. B.; KARLEN, D. L.; JAMES, D. E.; MEEK, D. W. Relationship Between Six Years of Corn Yields and Terrain Attributes. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 4, p.87-101, 2003.

KHOSLA, R.; INMANN, D.; WESTFALL, D.G.; REICH, R. M.; FRASIER, M.; MZUKU, M.; KOCH, B.; HORNUNG, A. A synthesis of multi-disciplinary research in precision agriculture: site-specific management zones in the semi-arid western Great Plains of the USA. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v.9, n.1, p. 85-100, 2008. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11119-008-9057-1> >.

KING, J. A. BRADLEY, R.I.; DAMPNEY, P. M. R.; LARK, R. M.; MAYR, T. R.; WHEELER, H. C.. Mapping Potential Crop Management Zones within Fields: Use of Yield-map Series and Patterns of Soil Physical Properties Identified by Electromagnetic Induction Sensing. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 6, n. 2, p. 167-181. 2005. ISSN 1385-2256. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11119-005-1033-4> >.

LI, Y.; SHI, Z.; LI, F.; LI, H.-Y. Delineation of site-specific management zones using fuzzy clustering analysis in a coastal saline land. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 56, n. 2, p. 174-186, Apr 2007b. ISSN 0168-1699.

LOWENBERG-DeBOER, J. Economics of variable rate planting for corn. In: of INTERNATIONAL CONFERENCE IN PRECISION AGRICULTURE, 4., 1998. Madison, 1998. p. 1643–1650.

MAHL, D.; GAMERO, C.A.; BENEZ, S.H.; FURLANI, C.E.A.; SILVA, A.R.B. Demanda energética e eficiência da distribuição de sementes de milho sob variação de velocidade e condição de solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.24, n.1, p.150-7, 2004.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 638p.

MANLY, B.J.F. **Métodos estatísticos multivariados: uma introdução**; tradução Sara Ianda Carmona, 3 ed., Porto Alegre: Bookman, 2008. 229p.

McBRATNEY, A.; ANCEV, T.; BOUMA, J.; WHELAN, B. Future Directions of Precision Agriculture. **Precision Agriculture**, v. 6, n. 1, p. 7-23, 2005. ISSN 1385-2256. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11119-005-0681-8>>.

MELO, F. de B.; CORA, J.E.; CARDOSO, M.J. Fertilização nitrogenada, densidade de plantas e rendimento de milho cultivado no sistema plantio direto. **Ciência Agrônômica** v.42, n.1, p. 27-31, 2011, ISSN 1806-6690.

MINGOTI, S.A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2013. 297p.

MOLIN, J.P. Agricultura de precisão. In: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Desenvolvimento Agropecuário e Cooperativismo. **Agricultura de precisão**:ed. Brasília : MAPA, 2011. 36p. (boletim técnico.2)

MOLIN, J.P. Agricultura de precisão: situação atual e perspectivas. In: FANCELLI, A. L.; DOURADO-NETO, D. **Milho: estratégias de manejo para alta produtividade**. Piracicaba: Editora, 2003. 208p.

MOLIN, J.P. **Agricultura de precisão – o gerenciamento da variabilidade**. Piracicaba: Editora 2001. 83p.

MOLIN, J.P. Definição de zonas de manejo a partir de mapas de produtividade. **Engenharia Agrícola**, Piracicaba, v. 22, p. 83-92, 2002.

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

MOLIN, J.P.; MASCARIN, L.S.; VIEIRA JR, P.A. Avaliação de intervenções em unidades de aplicação localizada de fertilizantes e de populações de milho. **Engenharia Agrícola**, Piracicaba, v. 26, n. 2, p. 528-536, 2006. ISSN 01006916 (ISSN). Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-33845391343&partnerID=40&md5=626df88c22b2a1e47ea2ab0218746fab>>.

MOORE, M. **An investigation into the accuracy of yield maps and their subsequent use in crop management**. 1998. 379p. (Doctorate thesis) - Silso; College, Cranfield University, Warwick, 1998.

National Research Council - Board on Agriculture, Committee on Assessing Crop Yield. **Precision Agriculture in the 21st Century**: Geospatial and Information Technologies in Crop Management Washington, D. C : National Academy Press, 1997. 168p.

ORTEGA, R.A.; SANTIBANEZ, O.A. Determination of management zones in corn (*Zea mays* L.) based on soil fertility. **Computers and Electronics in Agriculture**, cidade, v. 58, n. 1, p. 49-59, Aug 2007. ISSN 0168-1699. Disponível em: <GotoISI>://WOS:000247360600006>.

RAIJ, B.V. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. 420p.

REETZ, H. 20/20 Vision on precision - what the last 20 years has shown us / what the next 20 promises to give us. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF PRECISION AGRICULTURE, 10., 2010, Denver. **Proceedings...** Denver, 2010. (1 CD-ROM).

SANGOI, L. Understanding plant density effects on maize growth and development: na important issue to maximize grain yield. Por extensor. **Cienc. Rural**, Santa Maria, v.31, n.1, p. 159-168. 2000.

SANGOI, L.; GRACIETTI, M.A.; RAMPAZZO, C.; BIANCHETTI, P. Response of Brazilian maize hybrids from different eras to changes in plant population. Por extenso. **Field Crops Res.** v.79, p.39-51, 2002.

SANGOI, L.; GUIDOLIN, A.F.; COIMBRA, J.L.M.; SILVA, P.R.F. Resposta de híbridos de milho cultivados em diferentes épocas à população de plantas e ao despendoamento. **Ciência. Rural**, Santa Maria, v.36, n.5, p. 1367-1373, 2006.

SANGOI, L.; SCHMITT, A.; VIEIRA, J.; PICOLI JR., G.; SOUZA, C.; CASA, R.; SCHENATTO, D.; GIORDANI, W.; BONIATTI, C.; MACHADO, G.; HORN, D. Variabilidade na distribuição espacial de plantas na linha e rendimento de grãos de milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 11, n.3, p.268-277, 2013.

SCHEPERS, A.R. SHANAHAN, J.F.; LIEBIG, M.A.; SHEPERS, J.S.; JOHNSON, S.H.; LUCHIARI, A. Appropriateness of management zones for characterizing spatial variability of soil properties and irrigated corn yields across years. **Agronomy Journal**, v. 96, n. 1, p. 195-203, Jan-Feb 2004. ISSN 0002-1962. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:000188437400022 >.

SELCUK, A.; COLVIN, T. S. An Evaluation of the Response of Yield Monitors and Combines to Varying Yields. **Precision Agriculture**, cidade, v.3, p.107-122, 2002.

SERPA, M. S. **Adequação da densidade de plantas de milho à disponibilidade hídrica em semeadura direta**. 2011. 112p.. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

SHANAHAN J.F.; DOERG, T.; JHONSON, J.; VIRGIL, M. Feasibility of Site-Specific Management of Corn Hybrids and Plant Densities in the Great Plains. **Precision Agriculture**, Denver, v. 5, p. 207, 2004.

SPEKKEN, M.; ANSELM, A.A.; MOLIN, J.P. A simple method for filtering spatial data. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 9, 2013, Lleida, Catalonia. Precision Agriculture'13. **Proceedings...** Wageningen: Wageningen Academic Publishers, 2013. v. 1. p. 259-266.

STAFFORD, J.V; AMBLER, B.; LARK, R.M; CATT, J. Mapping and interpreting the yield variation in cereal crops. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 14, p. 101-119, 1996.

SUDDUTH, K.A.; KITCHEN, N.R.; DRUMMOND, S.T. Soil conductivity sensing on claypan soil: Comparison of electromagnetic induction and direct methods. In: INTERNATIONAL CONFERENCE IN PRECISION AGRICULTURE, 4., 1998. **Proceedings...** Denver, 1998. p. 979-990.

SUN, Y.; CHENG, Q.; DRUECKER, H.; HARTUNG, E.; HUEGING, H.; LIN, J.; ROLLER, O.; SCHLZE, LAMMERS, P.; ZENG, Q. Map-based investigation of soil physical conditions and crop yield using diverse sensor techniques. **Soil and Tillage Research**, v. 112, n. 2, p. 149-158, 2011. ISSN 0167-1987. Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198710002412> >.

SWINTON, S.M.; LOWENBERG-DEBOER, J. Evaluating the profitability of site-specific farming. **Journal of Production Agriculture**, Madison, v. 11, n. 4, p. 439-446, 1998.

THYLÉN, L.; JURSCHIK, P.; MURPHY, D.L.P. Improving the quality of yield data, In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 1, 1997. Warwick, **Proceedings...** Precision Agriculture'97, v.1, Warwick, 1997. p. 743-750.

TOKATLIDIS, I.S; KOUTROUBAS, S.D.A review of maize hybrids' dependence on high plant populations and its implications for crop yield stability. **Field Crop Research**, v.88, p.103–114, 2004.

TOLLENAAR, M. Is low plant population a stress in maize? **Maydica**, Bergamo, v. 37, p.305-311, 1992.

TOLLENAAR, M.; LEE, E.A. Yield potential, yield stability and stress tolerance in maize. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.75, p.161-169, 2002.

WIDDICOMBE, W.D.; THELEN, K.D. Row width and plant population effects on corn grain production in the northern Corn Belt. **Agronomy Journal**, Madison, v. 94, p.1020–1023, 2002.

WIEBOLD, W. J.; FRAISSE, C.W. Management Zone Analyst (MZA): Software for subfield management zone delineation. **Agronomy Journal**, Madison, v. 96, n. 1, p. 100-108, Jan-Feb 2004. ISSN 0002-1962.