

População de plantas e alguns atributos do solo relacionados ao rendimento de grãos de milho

Pedro Abel Vieira Junior¹, José Paulo Molin^{2*}, Durval Dourado Neto³, Paulo Augusto Manfron⁴, Leonardo Sanches Mascarin⁵, Gustavo Di Chiacchio Faulin⁵ e Euro Roberto Detomini⁶

¹Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), Cx. Postal 151, 35900-470, Sete Lagoas, Minas Gerais, Brasil.

²Departamento de Engenharia Rural, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Av. Pádua Dias, 11, Cx. Postal 09, 13418-900, Piracicaba, São Paulo, Brasil. ³Departamento de Produção Vegetal, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo. ⁴Departamento de Bioclimatologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil. ⁵Programa de Pós-graduação em Máquinas Agrícolas, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo. ⁶Programa de Pós-graduação em Fitotecnia, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo. *Autor para correspondência. e-mail: jpmolin@esalq.usp.br

RESUMO. A população e a distribuição espacial de plantas são fundamentais ao rendimento de grãos de milho, bem como suas interações com atributos do solo a exemplo de textura e fertilidade. Esse trabalho teve por objetivo investigar a aplicação de georreferenciamento em estudos agrônômicos, a exemplo das interações entre população e distribuição espacial de plantas de milho com os teores dos principais nutrientes no solo, mantendo-se os princípios básicos da estatística experimental. Os resultados demonstraram que o uso de parcelas amostrais georreferenciadas e análise de regressão são aplicáveis ao estudo dos efeitos da população e distribuição espacial de plantas, sendo possível ainda estimar os efeitos dos teores de fósforo, potássio, cálcio, magnésio e saturação por bases sobre o rendimento de grãos de milho. Ainda, a metodologia mostrou-se útil para estimar as variações no rendimento de grãos em função das variações na população e homogeneidade da distribuição espacial de plantas, bem como, determinar a população de plantas cujo rendimento de grãos é máximo, portanto, uma importante ferramenta ao planejamento da produção de milho.

Palavras-chave: agricultura de precisão, variabilidade espacial, Sistemas de Informações Geográficas, nutrientes, amostragem.

ABSTRACT. Plant population and some soil attributes related to corn yield. Studies regarding population and plant spatial distribution are essential for understanding yield crop processes. The goal of this work is to report the possibility of applying georeferenced information as tool mainly for agronomic studies, especially for corn production studies, such as interactions between population and plant spatial distribution and concentration of soil nutrients, maintaining the basic principles of statistics. The results show that georeferencing sampling localizations and regression analysis were together efficient, and it is possible to apply it for estimating plant population which provides the highest grain yield; in addition, analyzing the effects of soil nutrient concentrations on the grain yield. Further, the method show itself to be able to estimate the grain yield variation as function of plant population and spatial distribution variations, besides predicting which plant population provides the highest grain yield, according to different environments and genotypes.

Key words: precision agriculture, spatial variability, Geographical Information Systems, nutrient, sampling.

Introdução

A produção vegetal depende de fatores extrínsecos e intrínsecos à planta. Como exemplo de extrínsecos, cita-se a disponibilidade de CO₂, de água, de nutrientes e de radiação. Como exemplo de intrínsecos, cita-se o ciclo de fixação de CO₂, o

aparato fotossintético e a arquitetura foliar, entendendo-se como arquitetura foliar as dimensões e ângulo da folha em relação ao plano vertical, os quais são importantes determinantes da população e distribuição espacial de plantas. Os fatores extrínsecos, com exceção à radiação, podem ser manejados pelo Homem e, portanto, não se

constituem em empecilho ao aumento de produtividade (Machado, 1985; Duvick, 1992; Machado et al., 2001).

Em relação ao aparato fotossintético e ciclo de fixação de CO₂, em decorrência do seu metabolismo C₄, o milho apresenta-se como dos mais eficientes entre as plantas cultivadas, o que justifica a importância de estudos sobre a população, sobre a distribuição espacial de plantas e sobre a estrutura do dossel, esta caracterizada principalmente pelo Índice de Área Foliar (IAF, m² folha m⁻² solo) e por sua homogeneidade na gleba (Vieira Júnior, 1999; Kiniry et al., 2002; Pommel et al., 2002).

Considerando a relação entre IAF e a produção na cultura do milho, o IAF é função direta da população de plantas; entretanto, a produção não aumenta linearmente com o IAF, visto que é limitada pelo auto-sombreamento das folhas. Portanto, a radiação suficiente para saturar as folhas superiores não é suficiente para saturar a fotossíntese da cultura (Gifford e Evans, 1981; Machado, 1985; Sachulze e Caldwell, 1995; Vieira Júnior, 1999; Kiniry et al., 2002; Pommel et al., 2002).

A distribuição e a organização das folhas é função da população e, principalmente, da distribuição espacial das plantas, não sendo normalmente aleatória. A distribuição de plantas pode ser traduzida como a uniformidade do IAF na cultura, sendo que uma distribuição uniforme reduz o coeficiente de extinção da luz no dossel, resultando em maior produtividade (San Pietro et al., 1969; Loomis e Willians, 1969; Sachulze e Caldwell, 1995).

Teoricamente, a estrutura ideal de dossel é aquela que maximiza a interceptação da radiação e minimiza a irradiação, o que é obtido com a maximização e uniformidade do IAF da cultura (Kiniry et al., 2002); entretanto, no caso do milho, a produção de grãos por unidade de área aumenta linearmente com a população de plantas, até um máximo denominado "ponto crítico", pois, em razão da produção de grãos por planta permanecer constante, nessa faixa de população não há competição intra-específica. Acima da população crítica, em razão da competição intra-específica, a produção de grãos por planta decresce e a produção por área apresenta comportamento quadrático, possuindo um ponto de máxima produção por unidade de área (Dourado-Neto et al., 2001; Maddoni et al., 2001). Assim, a população correspondente ao ponto crítico é a população ideal para a combinação genótipo e a oferta ambiental.

Com relação à oferta ambiental, aspectos relacionados à nutrição e ao solo são importantes

componentes do rendimento na cultura do milho, visto que os aumentos de rendimentos verificados não são decorrentes de aumentos na produção biológica, mas sim, da melhor adaptação ecológica dos cultivares e do uso intensivo de tecnologia, principalmente a fertilização, filosofias da chamada Revolução Verde (Lovenstein et al., 1995; Horton, 2000).

Considerando aspectos relacionados ao solo, o milho desenvolve-se bem em solos com textura argilosa até arenosa. Entretanto, requer estrutura granular fina, bem desenvolvida com grânulos soltos ou friáveis e boa permeabilidade à água e ao ar. Assim, em ambientes com restrição hídrica, a exemplo do cultivo entre os meses de fevereiro a setembro na região do Brasil Central, o teor de argila afeta diretamente o suprimento de água e, conseqüentemente, a produção individual da planta (Coelho e França, 1995; Vieira Junior, 1999; Dourado-Neto et al., 2001).

As necessidades nutricionais variam em função da produção da planta, que, por sua vez, é função da interação com o ambiente; portanto, na exploração sustentada existe a necessidade de se disponibilizar à planta o total de nutrientes extraído, os quais devem ser fornecidos pelo solo e pelas adubações (Lovenstein et al., 1995). De modo geral, podem ser estabelecidas as seguintes ordens de extração: N = K > Mg > Ca = P > S > Fe > Zn = Mn > B > Cu > Mo, e de exportação: N > K > P > S = Mg > Ca > Zn > Fé > Mn > B > Cu > Mo; destacando-se que a extração de nitrogênio, fósforo, cálcio e magnésio aumentam linearmente com o aumento da produção (Bull, 1993; Coelho e França, 1995).

Dentre os macronutrientes, o nitrogênio representa importância com a adoção de tecnologia e aumentos de produção do sistema agrícola, pois é o elemento com maior requerimento e extração na cultura de milho, além de ser o mais móvel no sistema, tanto por lixiviação quanto por reação, razão pelas quais é complexa a sua avaliação temporal e espacial em um sistemas agrícolas (Doran e Parkin, 1996; Rajj et al., 1996; Burrough, 1999).

O potássio é o segundo elemento mais absorvido e extraído pelas plantas de milho, pois, é fundamental na regulação de processos fisiológicos, sendo bastante móvel na planta. Em relação à mobilidade no sistema, o potássio, embora menor que o nitrogênio, apresenta alta mobilidade, sendo a principal causa a lixiviação, afetada pela textura do solo. Com o aumento dos teores de fósforo no solo das principais regiões produtoras de milho do Brasil, tem-se verificado importantes respostas na produção de milho à adubação com potássio, notadamente em

solos cujo teor é inferior a $0,15 \text{ mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$ (Coelho e França, 1995; Raij *et al.*, 1996).

Apesar da menor exigência da planta de milho por fósforo em relação ao nitrogênio e ao potássio, as respostas à aplicação de fósforo são frequentes e as doses recomendadas são altas, notadamente em razão da baixa disponibilidade desse elemento nos solos brasileiros e da reduzida eficiência no aproveitamento, de cerca de 30%, desse elemento pela cultura. Entretanto, como sua lixiviação é mínima em solos minerais, com a exploração da gleba, esse elemento tende a acumular no solo promovendo ausência de resposta na produção de milho, notadamente em solos com teores acima de $40 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ (Coelho e França, 1995; Raij *et al.*, 1996; Burrough, 1999).

O cálcio, em geral, é o elemento que apresenta a terceira maior taxa de absorção pelo milho, entretanto, em razão da sua baixa mobilidade na planta, não ocupa a mesma posição relativa quanto à exportação. No sistema, o cálcio é pouco móvel, notadamente por lixiviação, contribuindo significativamente para aumento do pH e redução da taxa de alumínio no solo, fatores expressos pela relação entre a soma de bases e a capacidade de troca catiônica potencial do solo, denominada saturação por bases (V%), os quais interferem diretamente na nutrição das plantas (Doran e Parkin, 1996; Raij *et al.*, 1996; Burrough, 1999).

O magnésio é o quarto elemento mais absorvido pelas plantas de milho, entretanto, sua exportação é inferior à do fósforo. A importância do magnésio é semelhante à do cálcio, sendo a relação cálcio e magnésio ideal entre três e cinco, com reflexos, principalmente, sobre a absorção de potássio (Doran e Parkin, 1996; Raij *et al.*, 1996; Burrough, 1999).

Com o surgimento de novos genótipos e técnicas de manejo para a cultura de milho, estudos têm sido realizados para a determinação de uma melhor população e distribuição espacial de plantas (Pereira Filho *et al.*, 1998; Duarte e Paterniani, 2000; Maddoni *et al.*, 2001), entretanto, Molin (2000), Fancelli e Dourado-Neto (2000) e Braga e Jones (2001) consideram essenciais, e ao mesmo tempo escassas, informações para quantificar a interação desses efeitos com a oferta ambiental, notadamente aspectos relacionados ao solo. Em geral, a escassez dessas informações é decorrente da complexidade na instalação de experimentos em delineamentos tradicionais, a exemplo de blocos de parcelas com repetições, para avaliação das interações entre população e distribuição espacial de plantas com

atributos do solo (Warick e Nielsen, 1980; Luchiari *et al.*, 2001; Braga e Jones, 2001).

Na década de 80, os Sistemas de Navegação Global por Satélites (SNGS), especialmente o sistema militar GPS, e os Sistemas de Informações Geográficas (SIG), provocaram considerável desenvolvimento nas técnicas e processos dos mais variados domínios das suas aplicações: navegação, cartografia, cadastro, defesa, agricultura, florestas, arqueologia e geofísica, entre outras.

O GPS é um sistema que permite determinar posições expressas em latitude, longitude e altura geométrica ou elipsoidal. Consiste de três segmentos principais: espacial, controle e de usuário. Os satélites que compõem o seu segmento espacial orbitam ao redor da Terra distribuídos em seis órbitas distintas, a uma altitude de 20.200 km, distribuídos em seis planos orbitais com uma inclinação de 55° em relação ao equador, e com um período de revolução de 12 horas siderais. Essa configuração garante que, no mínimo, quatro satélites GPS sejam visíveis em qualquer local da superfície terrestre ou acima dela, a qualquer hora do dia (Bernardi e Landim, 2002).

Já o SIG permite capturar, modelar, manipular, recuperar, consultar, analisar e apresentar dados geograficamente referenciados. A técnica de SIG pode ser útil em atividades de pesquisa agrícola devido à sua capacidade de manipular a informação espacial¹ de forma acurada e rápida (Burroughs e McDonnell, 1998).

Com o advento dos SNGS e dos SIG, os quais permitem facilmente a localização geográfica de pontos e também o armazenamento de informações referentes àqueles pontos (Luchiari *et al.*, 2001; Molin, 2001; Braga e Jones, 2001), vislumbra-se a possibilidade de aplicação dessas técnicas para estudos agrônômicos, a exemplo das interações entre população e distribuição espacial de plantas com teores de nutrientes no solo, mantendo-se os princípios básicos da estatística experimental, quais sejam, unidade experimental, repetição e casualização (Gomes, 1963; Weiss e Hassett, 1982).

O objetivo do presente trabalho foi propor uma metodologia alternativa aos experimentos clássicos de parcelas com repetições para estudo dos efeitos sobre o rendimento de grãos de milho, das interações entre a população e a distribuição

¹O termo espacial é utilizado como sinônimo de georeferenciado, ou seja, referenciado a uma região do espaço geográfico (Burroughs e McDonnell, 1998).

espacial de plantas de milho com alguns atributos do solo. Para tanto, propôs-se uma metodologia baseada no estudo da regressão das medidas obtidas em pontos amostrais com SIG.

Material e métodos

O presente trabalho foi realizado em uma gleba com 22,2 hectares, localizada no município de Campos Novos Paulista, Estado de São Paulo, semeada com milho em 2/3/2003, portanto, em período de "safre"². A população de plantas proposta, seguindo a recomendação da empresa produtora de sementes, foi de 60.000 plantas.ha⁻¹, portanto, coerente à recomendação de Duarte e Paterniani (2000) e Fancelli e Dourado Neto (2000). Para tanto, foram distribuídas 70 mil sementes.ha⁻¹ em linhas espaçadas de 0,50 metro, sob semeadura direta e com aplicações uniformes de fertilizantes.

Previamente à semeadura foram coletadas amostras de solo, nas quais foram determinados os teores de argila (Arg, %), fósforo (P, mg.dm⁻³), potássio (K, mmolc.dm⁻³), cálcio (Ca, mmolc.dm⁻³), magnésio (Mg, mmolc.dm⁻³) e calculada a saturação por bases (V, %), conforme apresentado na Figura 1. Os pontos de coleta de solo foram determinados em grade amostral com resolução de 60 metros. Para a composição das amostras de solo, foram tomadas oito sub-amostras à profundidade de zero a 0,20 metros, em raio de cinco metros do ponto central de cada célula da grade, localizado com GPS diferencial, totalizando em torno de 80 m² de área amostral, num total de 63 pontos amostrais na gleba.

Durante o estágio fenológico de florescimento, nos pontos de coleta de solo, foram determinadas as populações de plantas (População, plantas.ha⁻¹) e de plantas normais (População final, plantas.ha⁻¹) excluindo as plantas dominadas - considerando como plantas dominadas aquelas com desenvolvimento aquém das plantas vizinhas e sem a formação de espigas - presentes em amostras de 10 metros lineares em três linhas de semeadura, considerado como a parcela amostral com área aproximada de 15 m². Ainda nessas parcelas, foram medidas as distâncias entre as plantas na linha de semeadura, calculando-se o coeficiente de variação (CV, %) das distâncias.

Considerando que a distância entre linhas de

semeadura foi fixa (0,50 m), o coeficiente de variação (CV, %) das distâncias entre plantas na linha foi utilizado como indicativo da homogeneidade da distribuição espacial de plantas.

Os rendimentos da cultura foram medidos com uma colhedora NH 59 (New Holland®) empregando um monitor de produtividade NH PLMS produzido pela empresa AgLeader®, funcionando com detecção de massa por placa de impacto e GPS Trimble® com correção por algoritmo interno. Dos rendimentos amostrados, foram eliminados os pontos com rendimentos e teores de água nulos, os pontos localizados fora do perímetro da gleba ou com distância nula e os pontos localizados na faixa próxima à borda da gleba, correspondente ao tempo de enchimento, conforme descritos em Molin e Menegatti (2002). Após, com emprego do SIG SSTollbox (SST Development Group®) e considerando as coordenadas geográficas, foram selecionados os rendimentos obtidos em torno do ponto amostral, correspondendo ao raio de 5 metros, calculando-se o rendimento de grãos médio dessa área.

Com emprego do sistema computacional R (Ribeiro Júnior e Brown, 2001), os resultados dos rendimentos de grãos dos pontos foram relacionados às populações de plantas total e normal, determinando-se o coeficiente de determinação (r², %), sua significância a 5% de probabilidade e, por análise de regressão, a equação para estimativa do rendimento de grãos em função das populações de plantas. Derivando-se a equação obteve-se a população final (População final, plantas.ha⁻¹) cujo rendimento de grãos (Rend, kg.ha⁻¹) foi máximo.

Ainda, com emprego do sistema computacional R (Ribeiro Júnior e Brown, 2001), foram determinados os coeficientes de determinação (r², %), sua significância a 5% de probabilidade e as equações da análise de regressão para o rendimento de grãos em função do coeficiente de variação das distâncias entre as plantas na linha de semeadura (CV, %) e dos teores de argila (Arg, %), fósforo (P, mg.dm⁻³), potássio (K, mmolc.dm⁻³), cálcio (Ca, mmolc.dm⁻³), magnésio (Mg, mmolc.dm⁻³) e saturação por bases (V, %). Ainda, foram determinadas as relações e respectivas equações entre as populações de plantas normais e os teores de argila, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e saturação por bases, bem como, entre os coeficientes de variação das distâncias entre plantas na linha de semeadura e os teores citados.

²Duarte e Paterniani (2000) e Fancelli e Dourado Neto (2000) destacam a restrição hídrica como uma das principais limitações ao cultivo de milho entre os meses de Fevereiro a Julho na região em questão, sugerindo genericamente a redução da população de plantas de milho para cerca de 55.000 plantas.ha⁻¹ como paliativo.

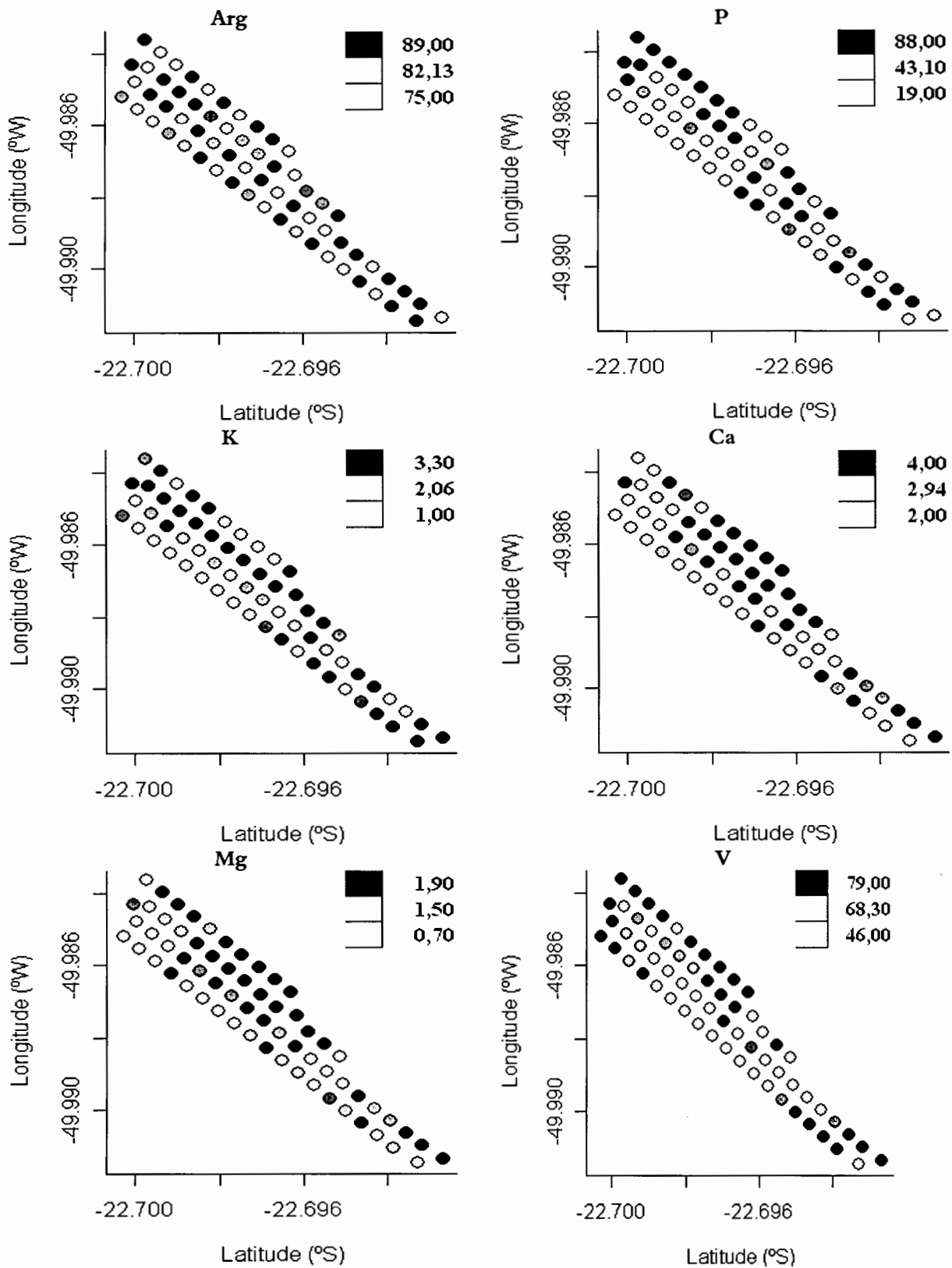


Figura 1. Teores de argila (Arg, %), fósforo (P, mg.dm⁻³), potássio (K, mmol_c.dm⁻³), cálcio (Ca, mmol_c.dm⁻³), magnésio (Mg, mmol_c.dm⁻³) e saturação por bases (V, %) verificados nos pontos amostrais anterior à semeadura de milho.

Resultados e discussão

O rendimento de grãos da cultura variou entre 2.255 a 5.672 kg.ha⁻¹, demonstrando, segundo Dourado Neto et al. (2001) e Fancelli e Dourado Neto (2000), haver variação de fatores da cultura e/ou da oferta ambiental.

Com relação à influência no rendimento de grãos dos fatores relacionados ao solo, a saber, os teores de argila (Arg, %), fósforo (P, mg.dm⁻³), potássio (K, mmol.dm⁻³), cálcio (Ca, mmol.dm⁻³), magnésio (Mg, mmol.dm⁻³) e saturação por bases (V, %), apenas o teor de argila apresentou coeficiente de determinação significativo ($r^2 = 0,3647$). Os resultados dos coeficientes de determinação entre o rendimento de grãos e os teores de fósforo (P, mg.dm⁻³; $r^2 = 0,1315$), potássio (K, mmol.dm⁻³; $r^2 = 0,0962$), cálcio (Ca, mmol.dm⁻³; $r^2 = 0,0587$), magnésio (Mg, mmol.dm⁻³; $r^2 = 0,0962$) e saturação por bases (V, %; $r^2 = 0,0090$), corroboram os obtidos por Vieira Junior et al. (2004), em que os teores de nutrientes do solo não explicavam a variação no rendimento da cultura do milho, fato atribuído pelos autores à relativa maior importância de outros fatores de rendimento, notadamente a população e distribuição espacial de plantas.

Quanto ao efeito significativo ($r^2 = 0,3647$) do teor de argila sobre o rendimento de grãos (Figura 2), embora discordando dos resultados obtidos por Vieira Junior et al. (2004), a observação é coerente considerando tratar-se de cultivo em período cuja principal limitação é o déficit hídrico e o efeito positivo de teores de argila maiores sobre a disponibilidade hídrica à cultura (Duarte e Paterniani, 2000).

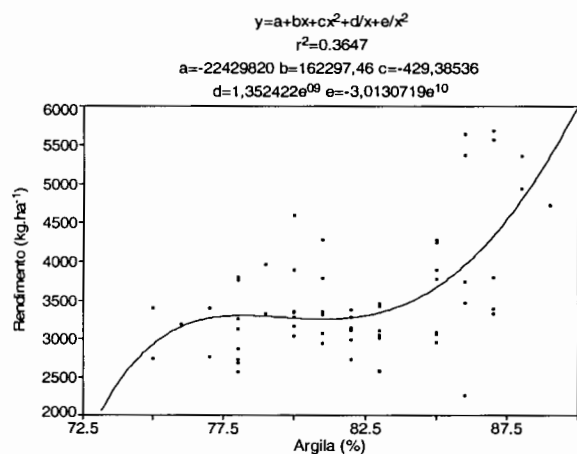


Figura 2. Rendimentos de grãos de milho (Rend, kg.ha⁻¹) em função do teor de argila no solo (Argila, %).

Analisando-se a influência da população e distribuição espacial de plantas sobre o rendimento de grãos, concordando com Dourado-Neto et al. (2001) e Fancelli e Dourado Neto (2000), verificou-se que a

população total de plantas (Figura 3) contribuiu significativamente (28,67%) para a redução no rendimento de grãos. Entretanto, quando considerado apenas a população de plantas normais (População final, Plantas.ha⁻¹) o fator apresentou coeficiente de determinação significativo (39,69%) com o rendimento de grãos (Figura 3), indicando que as plantas dominadas subtraídas da amostra não contribuem significativamente para o rendimento de grãos. Observa-se que as populações de plantas medidas variaram entre 58.000 a 76.000 Plantas.ha⁻¹, indicando pela heterogeneidade na distribuição espacial das plantas, além de, em muitos casos, ser superior à população recomendada de 60.000 Plantas.ha⁻¹. Essa observação é coerente com Dias e Barros (1995), Marcos Filho (1995) e Vieira Junior (1999), os quais consideram que a intensidade de plantas dominadas é diretamente proporcional ao excesso e a heterogeneidade na distribuição espacial das plantas, contribuindo negativamente para o rendimento da cultura.

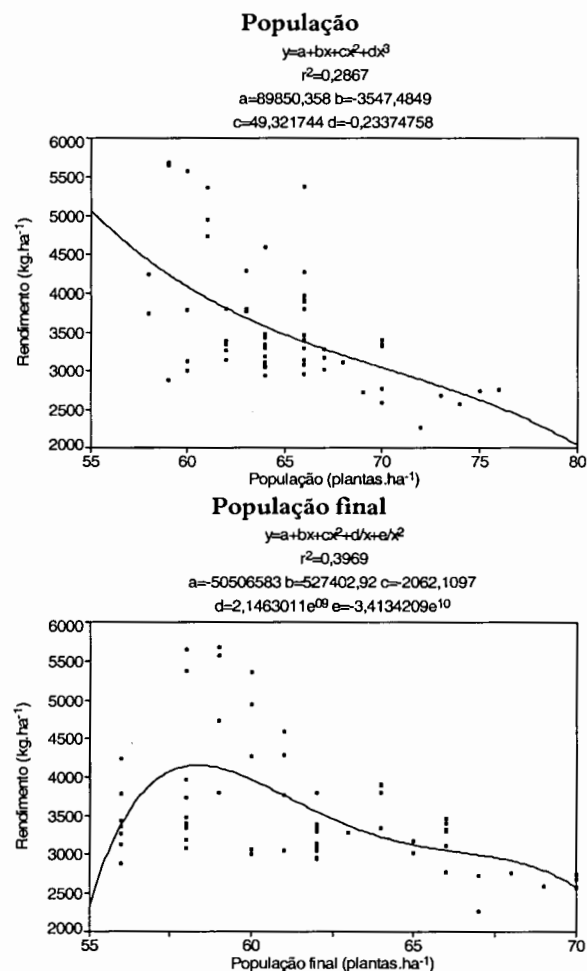


Figura 3. Rendimentos de grãos de milho (Rend, kg.ha⁻¹) em função da população total de plantas (População, Plantas.ha⁻¹) e da população de plantas normais (População final, Plantas.ha⁻¹).

Em relação à homogeneidade na distribuição espacial das plantas, indicada pelo coeficiente de variação das distâncias entre plantas na linha de semeadura (CV, %), segundo Ohio State University (2004) e Molin (2000), além de fatores relacionados ao vigor das sementes, a distribuição espacial de plantas é função direta das características de desempenho da semeadora utilizada e de sua interação com a classificação das sementes por dimensões, no caso de semeadoras de disco. No presente estudo verificou-se que o CV, cujo coeficiente de determinação foi 39,17%, também reduziu significativamente o rendimento de grãos (Figura 4), sendo mais intensa até 17,32%, correspondendo ao ponto de inflexão da curva obtido pela segunda derivação da equação de regressão.

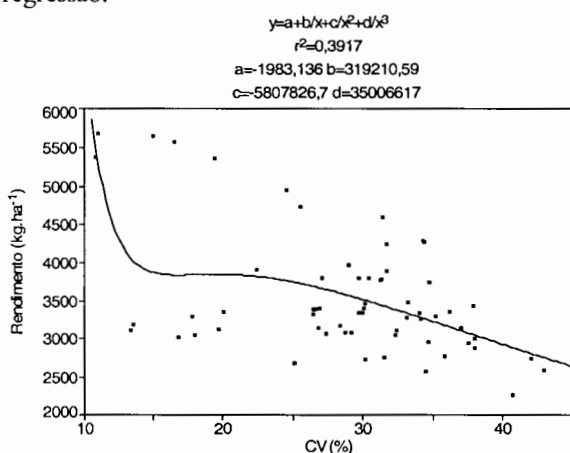


Figura 4. Rendimentos de grãos de milho (Rend, kg.ha⁻¹) em função coeficiente de variação das distâncias entre as plantas na linha de semeadura (CV, %).

Considerando o exposto sobre população e distribuição espacial de plantas, fica patente a importância desses fatores para o rendimento de grãos na cultura do milho, pois, no presente caso ambos os fatores afetaram individualmente, aproximadamente 40% do rendimento de grãos. Especial atenção deve ser dispensada à qualidade das sementes e a regulação e operação da semeadora com o objetivo de manter o coeficiente de variação das distâncias entre plantas na linha de semeadura menor que, aproximadamente 20%, valor cujo efeito da distribuição espacial de plantas passa a ter menor importância sobre o rendimento de grãos.

Dourado-Neto *et al.* (2001) e Vieira Junior (1999) recomendam a utilização de população de sementes suficiente para obter a população de plantas cujo rendimento de grãos é máximo, considerando a oferta ambiental. No presente caso, derivando a equação para estimativa do rendimento de grãos em função da

população de plantas normais, obteve-se que o máximo rendimento de grãos foi obtido com a população de 58.392 plantas normais.ha⁻¹, resultado coerente aos rendimentos obtidos, pois, quando considerada a população entre 58 a 59 mil plantas normais.ha⁻¹, o rendimento de grãos variou entre 3.071 e 5.672 kg.ha⁻¹.

Embora os efeitos sobre o rendimento de grãos para os teores de fósforo (P, mg.dm⁻³), potássio (K, mmol_c.dm⁻³), cálcio (Ca, mmol_c.dm⁻³), magnésio (Mg, mmol_c.dm⁻³) e saturação por bases (V, %), não foram significativos, quando combinados à população de plantas normais (População final, Plantas.ha⁻¹), em todos os casos os coeficientes de determinação foram significativos, corroborando a importância da população de plantas sobre o rendimento de grãos na cultura do milho e indicando a necessidade do estudo conjunto dos teores e população de plantas normais.

Quando analisado o efeito do teor de fósforo no solo em conjunto com a população de plantas normais (População final, Plantas.ha⁻¹) sobre o rendimento de grãos (Figura 5), determinou-se, pela equação de regressão, que, até a população de 58.163 plantas normais por hectare o rendimento de grãos foi crescente (4.498 kg.ha⁻¹), correspondendo ao teor de 38,7 mg.dm⁻³ de fósforo no solo, reduzindo para 2.265 kg.ha⁻¹ com teor de 57,2 mg.dm⁻³ de fósforo no solo e população de 70.000 plantas normais por hectare. Embora contrariando resultados obtidos por vários autores a exemplo de Coelho e França (1995), a redução no rendimento de grãos para teores de fósforo maiores que 38,7 mg.dm⁻³ pode ser resultado da relação do teor desse elemento com os teores de outros elementos, a exemplo de nitrogênio e potássio, sendo recomendada a relação 1:0,5:1 entre nitrogênio, fósforo e potássio (Coelho e França, 1995).

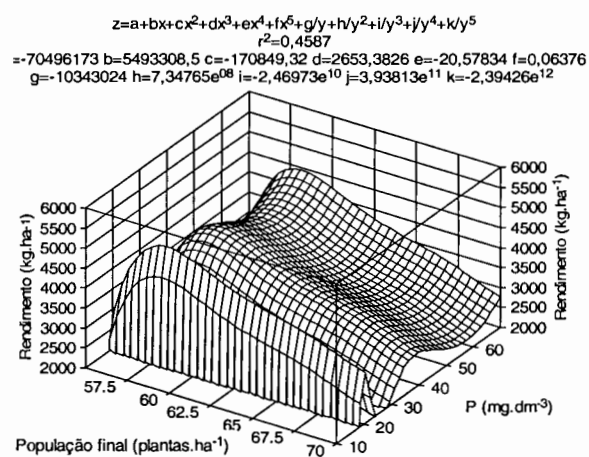


Figura 5. Rendimentos de grãos de milho (Rend, kg.ha⁻¹) da população de plantas normais (População final, Plantas.ha⁻¹) e do teor de fósforo no solo (P, mg.dm⁻³).

Com relação ao potássio, os resultados da análise conjunta (Figura 6) indicam que o rendimento de grãos foi crescente até o teor de $3,3 \text{ mmol}_c.\text{dm}^{-3}$ no solo, correspondendo à população de 58.089 plantas normais por hectare, decrescendo para o rendimento estimado pela equação de regressão de $2.080 \text{ kg}.\text{ha}^{-1}$ com teor de $1,0 \text{ mmol}_c.\text{dm}^{-3}$ de potássio no solo e população de 68.848 plantas normais por hectare, ponto em que o rendimento voltou a apresentar comportamento crescente em função do teor de potássio no solo. O comportamento pode ser atribuído aos altos teores de potássio do solo e, semelhante ao fósforo, às relações entre potássio e outros elementos do solo.

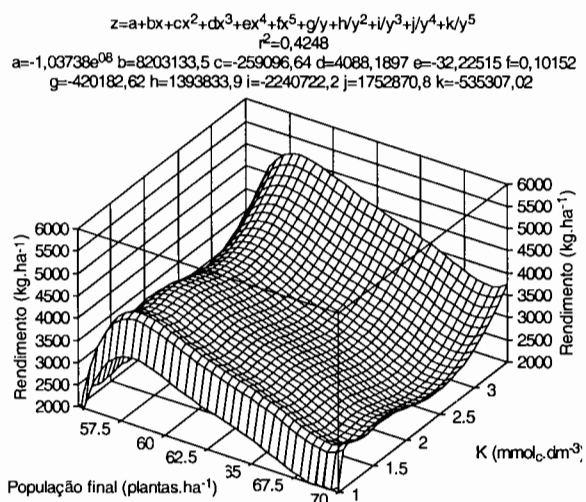


Figura 6. Rendimentos de grãos de milho (Rend, $\text{kg}.\text{ha}^{-1}$) da população de plantas normais (População final, $\text{Plantas}.\text{ha}^{-1}$) e do teor de potássio no solo (K, $\text{mmol}_c.\text{dm}^{-3}$).

O rendimento de grãos em função da interação entre cálcio e população de plantas normais (Figura 7), foi máximo para o teor de $3,6 \text{ mmol}_c.\text{dm}^{-3}$ e população de 58.069 plantas normais por hectare, decrescendo até $1130 \text{ kg}.\text{ha}^{-1}$, correspondendo ao teor de $2,0 \text{ mmol}_c.\text{dm}^{-3}$ e população de 68.512 plantas normais por hectare, quando passou a crescer. Os resultados são coerentes às recomendações sobre esse elemento, notadamente quando considerada a sua relação com o teor de magnésio.

Já a interação entre os teores de magnésio e a população de plantas normais (Figura 8), o rendimento de grãos máximo ($4764 \text{ kg}.\text{ha}^{-1}$) correspondeu à população de 57.865 plantas normais e o teor de $1,9 \text{ mmol}_c.\text{dm}^{-3}$. Semelhante ao cálcio, os resultados também são coerentes às recomendações sobre esse elemento, notadamente quando considerada a relação com o teor de cálcio presente de 1,47:1.

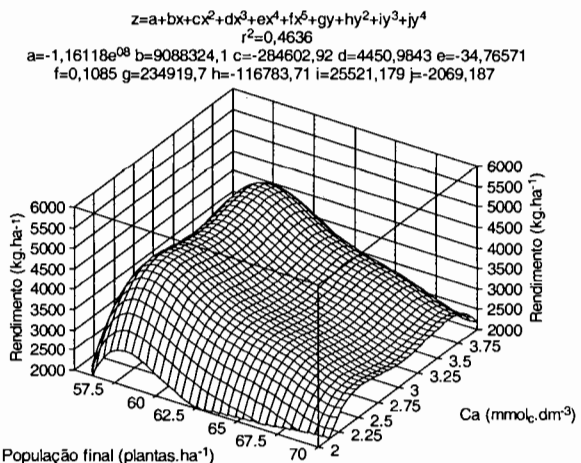


Figura 7. Rendimentos de grãos de milho (Rend, $\text{kg}.\text{ha}^{-1}$) em função da população de plantas normais (População final, $\text{Plantas}.\text{ha}^{-1}$) e do teor de cálcio no solo (Ca, $\text{mmol}_c.\text{dm}^{-3}$).

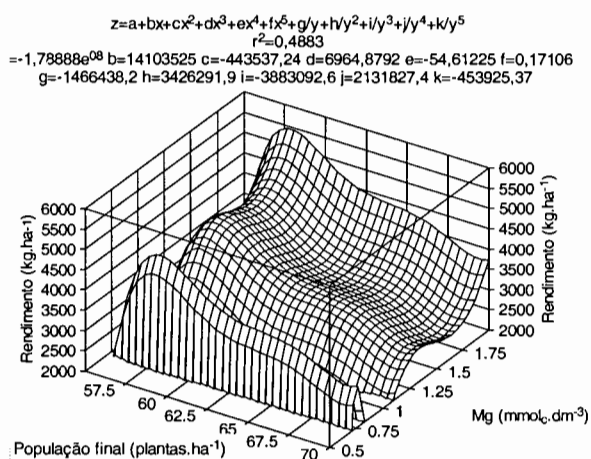


Figura 8. Rendimentos de grãos de milho (Rend, $\text{kg}.\text{ha}^{-1}$) da população de plantas normais (População final, $\text{Plantas}.\text{ha}^{-1}$) e do teor de cálcio no solo (Ca, $\text{mmol}_c.\text{dm}^{-3}$) e do teor de magnésio no solo (Mg, $\text{mmol}_c.\text{dm}^{-3}$) respectivamente.

A relação entre a saturação por bases conjuntamente à população de plantas normais (Figura 9), considerando a população de 58.086 plantas normais, indica que o rendimento foi crescente até a saturação por bases de 71,7%, com rendimento de grãos estimado pela equação de regressão de $4.504 \text{ kg}.\text{ha}^{-1}$, quando passou a decrescer.

Considerando os resultados obtidos e as recomendações na literatura consultada, é possível inferir, para o rendimento de grãos, sobre a necessidade do estudo conjunto dos efeitos da população de plantas e os teores de nutrientes do solo. Para tanto, a metodologia empregada da localização de parcelas amostrais georreferenciadas e de análise de regressão conjunta mostrou-se eficiente, sendo possível, portanto, estimar a

população de plantas cujo rendimento de grãos é máximo e, considerando-se essa estimativa, analisar os efeitos dos teores de nutrientes do solo sobre o rendimento de grãos. Ainda, a metodologia mostrou ser uma ferramenta eficaz para estimar as variações no rendimento de grãos em função das variações na população de plantas e na homogeneidade da distribuição espacial de plantas, bem como para determinar a população de plantas normais cujo rendimento de grãos é maximizado, para diferentes ambientes e genótipos.

$$z = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4 + fx^5 + gy + hy^2 + iy^3 + jy^4 + ky^5$$

$$r^2 = 0,4580$$

$$a = -1,03752e^{08} \quad b = 7773441,9 \quad c = -243104,1 \quad d = 3797,3423 \quad e = -29,62762 \quad f = 0,0927$$

$$g = 348493,43 \quad h = -10826,85 \quad i = 166,62716 \quad j = -1,27105 \quad k = 0,00385$$

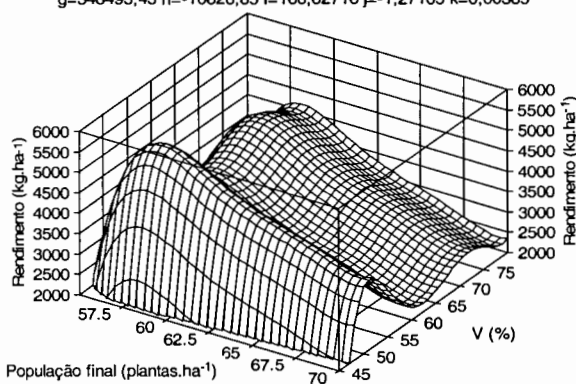


Figura 9. Rendimentos de grãos de milho (Rend, kg.ha⁻¹) da população de plantas normais (População final, Plantas.ha⁻¹) e da saturação por bases no solo (V, %).

Conclusão

A população e a homogeneidade da distribuição espacial de plantas são importantes fatores no rendimento de grãos de milho, recomendando-se, para maximização do rendimento de grãos, a determinação da população ideal considerando diferentes ambientes e genótipos e a redução do coeficiente de variação das distâncias entre plantas na linha de semeadura para valores menores que 20%.

A metodologia proposta do emprego de parcelas amostrais georreferenciadas e análise de regressão mostrou-se aplicável ao estudo dos efeitos da população e distribuição espacial de plantas, sendo possível, neste caso, ainda estimar os efeitos dos teores de fósforo, potássio, cálcio, magnésio e saturação por bases sobre o rendimento de grãos de milho.

Agradecimentos

Aos proprietários da Fazenda Velha Lagoa, local do experimento e à empresa New Holland Latin América pelo apoio contínuo nas atividades de pesquisa no local. A Fundação de Apoio à Pesquisa

do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro.

Referências

- BERNARDI, J.V.E.; LANDIM, P.M.B. *Aplicação do Sistema de Posicionamento Global (GPS) na coleta de dados*. Rio Claro: DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, 2002.
- BRAGA, R.P.; JONES, J.W. Interaction among soil-water, plant population, soil depth, texture, crop growth, yield components, terrain attributes and impacts on spatial yield. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE AND OTHER RESOURCE MANAGEMENT, 5., 2000. Minnesota. *Proceedings...* Minnesota: ASA, CSSA, SSSA, CD-ROM, 2001.
- BULL, L.T. Nutrição mineral do milho. In: BULL, L.T. (Ed.). *Cultura do milho: fatores que afetam a produtividade*. Piracicaba: Potafós, p. 63-145, 1993.
- BURROUGHS, P.P.; MCDONNELL, R.A. Principles of GIS. Oxford: Oxford University Press, 1998.
- BURROUGH, P.A. Soil variability: a late 20th century view. *Soils and Fertilizers*, Farnham, v. 56, p. 529-562, 1999.
- COELHO, A.M.; FRANÇA, G.E. Seja doutor do seu milho: nutrição e adubação. *Arquivo do Agrônomo*, Piracicaba, n. 2, 1995.
- DIAS, M.C.L.L.; BARROS, S.A.R. *Avaliação da qualidade de sementes de milho*. Londrina: IAPAR. 43 p. (Iapar circular técnica 88), 1995.
- DORAN, J.W.; PARKIN, T.B. Quantitative indicator of soil quality: a minimum data set. In: DORAN, J.W.; JONES, A.J. (Ed.). *Method for assessing soil quality*. Madison: Soil Science Society of America (SSA, p. 25-38, 1996.
- DOURADO NETO, D. et al. Milho: população e distribuição de plantas. In: FANCELLI, A.L.; DOURADO NETO, D. (Ed.). *Milho: tecnologia da produtividade*. Piracicaba: Esalq, Depto. Produção Vegetal, p. 120-125, 2001.
- DUARTE, A.P.; PATERNIANI, M.E.A.G.Z. *Fatores bióticos e abióticos em cultivares de milho e estratificação ambiental: avaliação IAC/CATI/Empresas - 1999/2000*. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 150p, 2000.
- DUVICK D.N. *Genetic contributions to advances in yield of U.S. maize*. Maydica: Bergamo, v. 37, p. 69-79, 1992.
- FANCELLI, A.L.; DOURADO NETO, D. *Produção de milho*. Guaíba: Agropecuária, 2000.
- GIFFORD, R.M.; EVANS, L.T. Photosynthesis, carbon partitioning and yield. *Annu. Rev. Plant Physiol.*, Palo Alto, v. 32, p. 485-509, 1981.
- GOMES, F.P. *Curso de estatística experimental*. Piracicaba: Esalq, p. 1-58, 1963.
- HORTON, P. Prospects for crops improvement through the genetic manipulation of photosynthesis: morphological and biochemical aspects of light capture. *J. Exp. Bot.*, Oxford, v. 51, p. 475-485, 2000.
- KINIRY, J.R. et al. Similarity of maize seed number responses for a diverse set of sites. *Agronomie*, Paris, v. 22, n. 3, p. 265-272, 2002.

- LOOMIS, R.S.; WILLIAMS, W.A. Productivity and the morphology of crops stands: pattern with leaves. In: EASTIN, J.D. (Ed.). *Physiological aspects of crop yield*. Madison: American Society of Agronomy, p. 27-47, 1969.
- LOVENSTEIN, H. et al. *Principles of production ecology*. Wageningen: Agricultural University of Wageningen, 1995.
- LUCIARI, A.JR., et al. Strategies for establishing management zones for site specific nutrient management. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE AND OTHER RESOURCE MANAGEMENT, 5., 2000. Minnesota. *Proceedings...* Minnesota: ASA, CSSA, SSSA, 10p. CD-ROM, 2001.
- MACHADO, E.C. Eficiência fotossintética. In: SEMINÁRIO DE BIOTECNOLOGIA AGRÍCOLA, 1985. Piracicaba. *Anais...* Piracicaba: Fealq, p. 175-200, 1985.
- MACHADO, S. et al. Spatial and temporal variability of sorghum and corn yield: interactions of biotic and abiotic factors. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE AND OTHER RESOURCE MANAGEMENT, 5., 2000. Minnesota. *Proceedings...* Minnesota: ASA, CSSA, SSSA, 10p. CD-ROM, 2001.
- MADDONI, G.A. et al. Plant population density, row spacing and hybrid effects on maize canopy architecture and light attenuation. *Field Crops Res.*, Amsterdam, v. 71, p. 183-193, 2001.
- MARCOS FILHO, J. Utilização de testes de vigor em programas de controle de qualidade de sementes. *Inf. Abrates*, Curitiba, v. 4, n. 2, p. 59-61. 1995.
- MOLIN, R. *Espaçamento entre linhas de semeadura na cultura de milho*. Castro: Fundação ABC, 2000.
- MOLIN, J.P. *Agricultura de precisão - o gerenciamento da variabilidade*. Piracicaba: José Paulo Molin, 2001.
- MOLIN, J.P.; MENEGATTI, L.A.A. Methodology for identification, characterization and removal of errors on yield maps. In: ASAE ANNUAL INTERNATIONAL MEETING / CIGR XVTH WORLD CONGRESS, 2002. Chicago. *Proceedings...* Chicago: ASAE CD-Rom, St. Joseph: ASAE, 2002 (Paper 021168).
- OHIO STATE UNIVERSITY. *Corn production*. (Bulletin, 472). Disponível em: <<http://www.ohioline.osy.edu/b472/front.html>>. acesso em: 8 jan. 2004.
- PEREIRA FILHO, I.A.P. et al. Milho verde: espaçamentos, densidades de plantas, cultivares e épocas de semeadura, influenciando o rendimento e algumas características de espigas comerciais (compact disc). In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 22., 1998. Recife. *Anais...* Recife: Embrapa, 1998.
- POMMEL, B. et al. Influence of delayed emergence and canopy skips on the growth and development of maize plants: a plant scale approach with CERES-Maize. *Eur. J. Agron.*, Amsterdam, v. 16, n. 4, p. 263-277, 2002.
- RAIJ, B. et al. *Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo*. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), 1996.
- RIBEIRO JUNIOR, P.J.; BROWN, P.E. Some words on the R project. *The ISBA Bulletin*, v. 1, n. 8, 2001.
- SACHULZE, E.D.; CALDWELL, M.M. *Ecophysiology of photosynthesis*. Berlin: Springer-Verlag, 1995.
- SAN PIETRO, A. et al. *Harvesting the sun*. New York: Academic Press Inc., 1969.
- VIEIRA JUNIOR, P.A. Milho. In: CASTRO, P.R.C.; KLUGE, R.A. (Ed.). *Ecofisiologia dos cultivos anuais*. São Paulo: Nobel, p. 41-72, 1999.
- VIEIRA JUNIOR, P.A. et al. Relação entre população, distribuição espacial de plantas, atributos do solo e rendimento de grãos de milho. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2004. Piracicaba. *Anais...* Piracicaba: Escola Superior de agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 2004. CD.
- WARICK, A.W. NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). *Applications of soil physics*. New York: Academic Press, p. 319-344, 1980.
- WEISS, N.A.; HASSETT, M. *Introductory statistics*. London: Addison-Wesley Publishing Company, 1982.

Received on March 28, 2005.

Accepted on August 01, 2006.