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

Desempenho da cultura de milho em função de arranjos espaciais

Matheus Santos Graffitti

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre
em Ciências. Área de concentração: Fitotecnia.

**Piracicaba
2020**

Matheus Santos Graffitti
Engenheiro Agrônomo

Desempenho da cultura de milho em função de arranjos espaciais
versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **DURVAL DOURADO NETO**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre
em Ciências. Área de concentração: Fitotecnia.

Piracicaba
2020

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

Graffitti, Matheus Santos

Desempenho da cultura de milho em função de arranjos espaciais /
Matheus Santos Graffitti. - - versão revisada de acordo com a resolução
CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2020.

65 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de
Queiroz”.

1. *Zea mays*, 2. População de plantas, 3. Distribuição de plantas, 4.
Eficiência do uso de radiação. 5. Sistema de produção. I. Título

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, pelo apoio incondicional

À DEUS, pela oportunidade concedida

AGRADECIMENTOS

Agradeço:

Ao meu orientador, Dr. Durval Dourado Neto.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo suporte financeiro por intermédio de bolsa de mestrado (24 meses).

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, e ao Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia desta instituição.

Aos meus amigos pelo apoio e ensinamentos concedidos.

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT.....	8
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	11
1. INTRODUÇÃO	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 PRODUÇÃO DE MILHO	17
2.2 FENOLOGIA.....	18
2.3 ARRANJO ESPACIAL E DENSIDADE DE PLANTAS	19
2.4 ARQUITETURA DA PARTE AÉREA.....	22
2.5 RADIAÇÃO SOLAR.....	23
2.6 FISIOLOGIA DA PRODUÇÃO	25
2.7 MODELAGEM EM AGRICULTURA	26
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
3.1 LOCAL	29
3.2 Delineamento Experimental.....	29
3.3 TRATOS CULTURAIS	30
3.4 POPULAÇÃO E ESPAÇAMENTO.....	31
3.5 AVALIAÇÕES	31
3.6 DADOS METEOROLÓGICOS	33
3.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA	35
4. RESULTADOS.....	37
4.1 DIÂMETRO DE COLMO, ALTURA DE PLANTA E ALTURA DE INSERÇÃO DE ESPIGA.....	37
4.2 RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA ABSORVIDA, ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR E VALOR SPAD	40
4.3 PRODUTIVIDADE E COMPONENTES DE PRODUÇÃO.....	45
5. DISCUSSÃO.....	51
5.1 DIÂMETRO DE COLMO, ALTURA DE PLANTA E ALTURA DE INSERÇÃO DE ESPIGA.....	51
5.2 RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA ABSORVIDA, ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR E VALOR SPAD	52
5.3 PRODUTIVIDADE E COMPONENTES DE PRODUÇÃO.....	53
6. CONCLUSÕES	57
REFERÊNCIAS	59

RESUMO

Desempenho da cultura de milho em função de arranjos espaciais

Com as transformações morfológicas na planta de milho ocorridas ao longo do tempo pelo melhoramento genético, é possível que o arranjo espacial de plantas possa ser ajustado de forma diferente ao que vinha sendo utilizado nas cultivares mais antigas. Assim, foi avaliado o desempenho de dois híbridos de milho com folhas semieretas (DKB 390) e eretas (DKB 230) em função de diferentes densidades de plantas (40, 70, 100 mil plantas ha⁻¹) e espaçamentos entre linhas (0,25; 0,50 e 1,00 m) sob irrigação na segunda safra. Foram analisados os seguintes parâmetros: (i) diâmetro de colmo, altura de planta e altura de inserção de espiga, (ii) radiação fotossinteticamente ativa absorvida, índice de área foliar e valor Spad, e (iii) produtividade e os componentes de produção da cultura de milho. O aumento da densidade de plantas aumentou a altura de planta e a altura de inserção de espiga, e reduziu o diâmetro do colmo. O aumento da densidade de plantas também aumentou a radiação fotossinteticamente ativa absorvida, o índice de área foliar, e reduziu o índice Spad. O IAF crítico foi 4,3 e 5,2 para os cultivares DKB 390 e DKB 230 respectivamente. Para ambos os híbridos não houve diferença entre os espaçamentos entre linhas na produtividade. O menor espaçamento proporcionou maior produção de matéria seca apenas para o híbrido DKB 390. O aumento da densidade de plantas aumentou a produtividade de grãos para ambos os híbridos. Esse aumento ocorreu principalmente pelo aumento do número de grãos por área, pela maior produção de matéria seca e também pelo maior número de espigas por área. A densidade de plantas estimada que proporcionou a maior produtividade para o híbrido DKB 390 foi 8,1 plantas m⁻² e para o híbrido DKB 230 foi 10 plantas m⁻². A maior interceptação de radiação fotossinteticamente ativa no híbrido DKB 390 não resultou em maior produtividade. O híbrido DKB 230 (folhas eretas) apresentou maior potencial produtivo em relação ao DKB 390 (folhas semieretas). O híbrido DKB 230 foi mais produtivo por apresentar maior índice de colheita, maior massa de mil grãos, maior número de grãos por área e massa de grãos por planta.

Palavras-chave: Densidade; População; Índice de área foliar; Eficiência de uso da radiação; Arranjo espacial de plantas.

ABSTRACT

Maize crop performance as a function of spatial arrangements

With the morphological changes in the corn plant that occurred over time due to genetic improvement, it is possible that the spatial arrangement of plants can be adjusted differently from what had been used in the older cultivars. Thus, the performance performance of two maize hybrids with semi-erect (DKB 390) and erect (DKB 230) leaves was evaluated as a function of different plant densities (4, 7, 10 plants m⁻²) and spacing between rows (0.25, 0.50 and 1.00 m) under irrigation in the second harvest. The following parameters were analyzed: (i) stem diameter, plant height and ear insertion height, (ii) photosynthetically active radiation absorbed, leaf area index and Spad value, and (iii) yield and yield components of the maize crop. The increase in plant density increased plant height and ear insertion height, and reduced stem diameter. The increase in plant density also increased the photosynthetically active radiation absorbed, the leaf area index, and reduced the Spad index. The critical IAF was 4.3 and 5.2 for cultivars DKB 390 and DKB 230 respectively. For both hybrids, there was no difference between spacing between lines in yield. The smaller spacing provided greater dry matter production only for the hybrid DKB 390. The increase in plant density increased grain yield for both hybrids. This increase was mainly due to the increase in the number of grains per area, the greater production of dry matter and the greater number of ears per area. The estimated plant density that provided the highest yield for the hybrid DKB 390 was 8.1 plants m⁻² and for the hybrid DKB 230 it was 10 plants m⁻². The greater interception of photosynthetically active radiation in the DKB 390 hybrid did not result in greater productivity. The hybrid DKB 230 (upright leaves) showed greater yield potential in relation to DKB 390 (semi-upright leaves). The DKB 230 hybrid had higher yield because it had a higher harvest index, a higher mass of a thousand grains, a greater number of grains per area and a mass of grains per plant.

Keywords: Density; Population; Leaf area index; Radiation use efficiency; Plants special arrangement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Variação da produção por unidade de planta (g planta^{-1}) e por unidade de área (kg ha^{-1}) em função da densidade de plantas (DOURADO NETO et al., 2001).	21
Figura 2. Híbrido 230 VT PRO3 no estágio reprodutivo R2 na segunda safra em Piracicaba, São Paulo.....	29
Figura 3. Híbrido 390 VT PRO3 no estágio vegetativo V16 na segunda safra em Piracicaba, São Paulo.....	30
Figura 4. Precipitação (A), temperatura (B) e radiação solar (C). Experimento de milho. Safra 2018/2019. Piracicaba, São Paulo.	34
Figura 5. Diâmetro de colmo (A), altura de planta (B) e altura de espiga (C) de híbridos de milho (DKB 230 e DKB 390) semeados com diferentes densidades de plantas. Safra 2018/2019. Piracicaba, São Paulo.	39
Figura 6. Diâmetro de colmo (A, B), altura de planta (C, D) e altura de espiga para os híbridos de milho DKB 390 e DKB 230. Safra 2018/2019. Piracicaba, São Paulo.	40
Figura 7. Radiação fotossinteticamente ativa absorvida relativa (PAR_{AR}) (A), índice de área foliar (B) e valor Spad (C, D) de híbridos de milho (DKB 230 e DKB 390). Safra 2018/2019. Piracicaba, São Paulo.	42
Figura 8. Relação entre a radiação fotossinteticamente ativa absorvida relativa (PAR_{AR}) e índice de área foliar (IAF) (A, B), dinâmica do índice de área foliar durante o ciclo da cultura (C, D), e relação da PAR_{AR} no pleno florescimento e densidade de plantas (E, F) em dois híbridos de milho. Safra 2018/2019. Piracicaba, São Paulo.....	43
Figura 9. Valor Spad para os híbridos de milho DKB 390 (a) e DKB 230 (b) avaliados da emissão até a senescência da 13ª folha em híbridos de milho (DKB 230 e DKB 390). Safra 2018/2019. Piracicaba, São Paulo.	44
Figura 10. Radiação fotossinteticamente ativa (A, B) e índice de área foliar (C, D) de híbridos de milho. Safra 2018/2019. Piracicaba, São Paulo.....	45
Figura 11. Produtividade (A), massa de mil grãos (B), grãos por fileira (C), fileiras por espiga (D), massa de grãos por planta (E) e espigas por planta (F) para os híbridos de milho DKB 390 e DKB 230. Safra 2018/2019. Piracicaba, São Paulo. Letras classificam as médias pelo teste de tukey a 5% de significância. Quando houve interação, letras minúsculas classificam cultivares, e letras maiúsculas classificam espaçamentos/densidades de plantas.	47
Figura 12. Espigas por área (A), grãos por fileira (B), fileiras por espiga (C), massa de grãos por planta (D), espigas por planta (E) e estimativa de densidade ótima (F) para os híbridos de	

milho DKB 390 e DKB 230 cultivadas na safra 2018/2019 em Piracicaba, São Paulo, Brasil. Letras classificam as médias pelo teste de tukey a 5% de significância. Quando houve interação, letras minúsculas classificam cultivares, e letras maiúsculas classificam espaçamentos/densidades de plantas.....49

Figura 13. Produtividade (A), massa de mil grãos (B), grãos por fileira (C), fileiras por espiga (D), massa de grãos por planta (E) e espigas por planta (F) para os híbridos de milho DKB 390 e DKB 230. Safra 2018/2019. Piracicaba, São Paulo.50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Estádio fenológico da cultura de milho quando 50% das plantas têm a característica descrita. A classificação divide o ciclo de crescimento em duas fases de desenvolvimento, a fase vegetativa (Vn) e a reprodutiva (Rn) (RITCHIE; HANWAY; BENSON, 1996).....	19
Tabela 2. Número de plantas por metro linear para as diferentes densidades de plantas e espaçamentos. Milho. Safra 2018/2019. Piracicaba, São Paulo.	31
Tabela 3. Significância das variáveis diâmetro de colmo, altura de planta e altura de inserção de espiga pelo teste F, quando submetidas a diferentes espaçamentos, densidades de plantas e híbridos de milho. Safra 2018/2019. Piracicaba, São Paulo.	37
Tabela 4. Significância das variáveis radiação fotossinteticamente ativa absorvida relativa (PAR_{AR}), índice de área foliar (IAF) e valor Spad pelo teste F, quando submetidas a diferentes espaçamentos, densidades de plantas e híbridos de milho. Avaliações realizadas em diferentes estádios fenológicos em plantas de milho. Safra 2018/2019. Piracicaba, São Paulo.	41
Tabela 5. Significância (p -valor) das variáveis produtividade (P), índice de colheita (IC), massa de mil grãos (MMG), grãos por área (GA), biomassa seca (MS), espigas por área (EA), grãos por fileira (GF), fileiras por espiga (FE), massa de grãos por planta (MGP), e espigas por planta (EP) oriundo de dois híbridos de milho submetidos a diferentes espaçamentos, densidade de plantas cultivadas. Safra 2018/2019. Piracicaba, São Paulo.	46

1. INTRODUÇÃO

O milho é um dos cereais mais cultivados no mundo, na média dos três últimos anos foram produzidas 1,15 bilhões de toneladas, e o Brasil é o terceiro maior produtor mundial, depois dos Estados Unidos e da China. Na média das safras 2015/2016 até 2017/2018 foram produzidos no Brasil 81,5 milhões de toneladas, equivalente a 7,1% da produção mundial (FAO, 2020). O milho está entre as principais *commodities* agrícolas produzidas no Brasil, apenas na safra 2018/2019 foram cultivados uma área de 17,5 milhões de hectares. A principal região produtora no Brasil é a centro-oeste, seguida pelas regiões Sul, Sudeste, Nordeste e Norte (CONAB, 2020).

A semeadura de milho é uma das práticas de manejo que mais afetam a produtividade (FERREIRA et al. 2019). Como os custos de produção têm aumentado nos últimos anos, é necessário que os produtores busquem o arranjo espacial (taxa de semeadura x espaçamento entre linhas) que maximize a produtividade. O aumento das densidades de semeadura de milho pode resultar em aumento da esterilidade de plantas e, portanto, menor produtividade, no entanto, menor densidade de semeadura também podem resultar em menor produtividade (FAWCETT et al., 2017), portanto, é necessário buscar um arranjo espacial adequado para cada híbrido.

A produtividade de uma cultura depende da capacidade da cobertura vegetal de interceptar a radiação incidente, que é uma função da área foliar disponível, da arquitetura da cobertura vegetal e da eficiência de conversão da energia capturada pela planta em biomassa (BHATTACHARYA, 2019). Para que se obtenham elevados rendimentos de grãos, recomenda-se elevar ao máximo a interceptação da radiação solar.

O arranjo de plantas pode ser ajustado por meio da densidade de plantas, no espaçamento entre linhas e na distribuição de plantas na linha, em que as variações na distância entre plantas na linha e nas entrelinhas atribuem os diferentes arranjos espaciais na lavoura (ALMEIDA JÚNIOR et al., 2018). O arranjo espacial de plantas visa distribuir a estrutura morfológica do dossel das plantas de modo que aumente a capacidade de interceptar a luz (BARET et al., 2018; CARON et al., 2012), sua eficiência fotossintética (EVERS; BASTIAANS, 2016) e o rendimento geral das culturas (ZHAI et al., 2017). A distribuição de luz no dossel das plantas influencia o balanço energético, o acúmulo de biomassa, o crescimento e o desenvolvimento das plantas (WIECHERS et al., 2011; CARON et al., 2012).

No Brasil, os primeiros espaçamentos utilizados para o milho concentravam-se de 0,80 a 0,90 m entre linhas, devido, principalmente para ajustar-se a plataforma de colheita mecanizada, que até então era inadequada para espaçamentos inferiores a 0,80 m. A redução para espaçamentos de 0,38 m e 0,50 m entre fileiras contribuíram para incrementos na produtividade média de 3 a 5% quando comparado com espaçamentos de 0,76 m (OSU, 2003).

No passado a densidade de plantas ideal para o cultivo de milho variava de 55.000 a 72.000 plantas ha^{-1} (FANCELLI; DOURADO NETO, 2000). No entanto, com as transformações na planta de milho proporcionadas pelo melhoramento genético, é possível que o arranjo de plantas, bem como a densidade utilizada seja ajustada. O aumento da densidade de plantas e redução do espaçamento na entre linha podem otimizar a produtividade de milho (PALHARES, 2003; SANGOI et al., 2005; SHER et al., 2017).

O ajuste fino no arranjo de plantas pode aumentar a produtividade em torno de 15% para a cultura de milho (KAPPES, 2010; GROSS, 2005), principalmente pela melhor interceptação da radiação fotossinteticamente ativa. Contudo, o aumento da densidade de plantas aumenta a produtividade até atingir o ponto máximo, sendo variável de acordo com o híbrido, condições edafoclimáticas do local e manejo da cultura (PEREIRA FILHO; CRUZ, 2004).

Apesar de todos os avanços na determinação do melhor espaçamento e densidade de plantas para os híbridos de milho, o aperfeiçoamento do cultivo baseado nas características específicas de cada híbrido como IAF, ângulo foliar (entre a base da folha e colmo) e otimização da interceptação luminosa pela aferição da diferença entre a PAR incidente no dossel da cultura e aquela transmitida relativa (PAR_{TR}) no solo, não são utilizados em termos práticos para a alocação dos materiais. Devido a importância da medição da radiação interceptada por uma cultura para formação de área foliar no monitoramento, nos estudos de relações hídricas, nutrição e modelos de simulação (BHATTACHARYA, 2019), poderia ser estabelecido qual é a radiação fotossinteticamente ativa ótima para os híbridos de milho utilizados atualmente.

Apesar de todos os avanços na recomendação de densidade de plantas para o milho, há poucos estudos atuais para a determinação do melhor arranjo em híbridos modernos. Este trabalho teve como objetivo avaliar a produtividade e aspectos de eficiência de uso da radiação em dois híbridos modernos de milho com arquitetura de parte aérea distintas em função de diferentes populações de plantas e espaçamentos entre linhas sob irrigação na segunda safra.

O presente trabalho foi desenvolvido com a seguinte hipótese: a maior produtividade dos híbridos de milho moderno é alcançada com a maior interceptação da radiação

fotossinteticamente ativa. Híbridos com folhas eretas são mais eficientes na absorção de radiação quando comparados aos de folhas semi eretas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Produção de milho

A produção brasileira de milho em grão na safra 2017/2018 foi de aproximadamente 82,5 milhões de toneladas (CONAB, 2020). O milho representa a terceira cultura mais produzida no Brasil, atrás apenas da soja e da cana-de-açúcar em termos de valor de produção agrícola durante o ano de 2018. A produção de milho é dividida em milho de primeira e de segunda safra, e a segunda safra é realizada após o cultivo de soja ou feijão (CONAB, 2020).

Na safra 2017/2018 o maior estado produtor de milho foi o Mato Grosso, que produziu 26,2 milhões de toneladas, seguido pelo estado do Paraná, que produziu 12,8 milhões de toneladas e em terceiro lugar o estado de Goiás, que produziu 9,0 milhões de toneladas (CONAB, 2020).

O milho é o cereal mais produzido pelo Brasil, sua destinação vai desde o arraaçoamento animal, a alimentação humana e a produção de energia. O consumo animal representa a maior parte do consumo total, e varia de 70 a 90%. Apesar do percentual de destino para a alimentação humana ser baixo, é um cereal de grande importância principalmente para a população de baixa renda (RIBEIRO, 2014).

A produtividade de uma cultura de milho depende diretamente da relação intrínseca estabelecida entre a planta e o ambiente físico em que se encontra, com ênfase para a temperatura, luz, ventos e disponibilidade hídrica, o que determina a adaptação de diferentes genótipos para diferentes ambientes (PALHARES, 2003). A densidade de plantas e o manejo estabelecido podem exercer grande influência na variação de produtividade do milho devido à baixa plasticidade morfológica e fenológica (VEGA et al., 2001; SILVA et al., 2006).

As exigências ambientais de clima, solo e água para crescimento e produtividade ótimos diferem de cultura para cultura e entre as variedades. A seleção da variedade melhor adaptada ao ambiente otimiza a produtividade. Do crescimento médio anual de produtividade, 48% é promovido por fatores genéticos e os outros 52% são atribuídos aos fatores ambientais (COELHO et al., 2003).

Define-se como produtividade potencial ou produtividade máxima de uma cultura aquela obtida de uma variedade altamente produtiva e bem adaptada ao ambiente de crescimento, em condições que não haja limitações de fatores, tais como: água, nutrientes, pragas e doenças, durante todo o ciclo da cultura (DOORENBOS; KASSAM, 1994). A

produtividade potencial no Brasil ainda é baixa quando comparamos com outros países, como Estados Unidos da América. Ainda é possível alcançar maior produtividade, principalmente com o melhor aproveitamento de fatores ambientais (COELHO et al., 2003).

2.2 Fenologia

A cultura de milho apresenta pouca elasticidade de crescimento quando comparada às outras espécies da família *Poaceae* (HANASHIRO et al., 2015). Isso em parte é explicado pelas variedades cultivadas serem compostas por uma única haste, sem perfilho, normalmente produzem somente uma espiga por planta, assim tem baixa capacidade de compensar falhas de emergência (SANTOS et al., 2018).

O milho é uma planta de ciclo vegetativo variado, que dura normalmente entre 110 a 180 dias, mas pode alcançar 300 dias o período compreendido entre a emergência e a maturidade fisiológica. Em função do ciclo, as variedades são caracterizadas em superprecoce, precoce e normal (FANCELLI; DOURADO NETO, 2000).

Os estádios de crescimento e desenvolvimento anteriores ao aparecimento das espigas são identificados, mediante a avaliação do número de folhas plenamente expandidas ou desdobradas. Assim, a folha de milho pode ser considerada desdobrada quando a mesma apresenta a linha de união lâmina-bainha facilmente visível. Para os estádios posteriores à emissão da espiga, a identificação deve ser efetuada com base no desenvolvimento e consistência dos grãos (KINIRY; BONHOMME, 1991).

O ciclo da cultura de milho é dividido em diferentes estádios durante a fase vegetativa e reprodutiva (Tabela 1) (RITCHIE et al., 1996). No estágio reprodutivo em que o milho se encontra com índice de área foliar superior à 5:1, constata-se 100% de eficiência da radiação solar (MÜLLER; BERGAMASCHI, 2005).

Tabela 1. Estádio fenológico da cultura de milho quando 50% das plantas têm a característica descrita. A classificação divide o ciclo de crescimento em duas fases de desenvolvimento, a fase vegetativa (Vn) e a reprodutiva (Rn) (RITCHIE; HANWAY; BENSON, 1996).

Fase	Estádio	Descrição
Vegetativa	V ₀	Emergência
	V ₂	2ª folha totalmente expandida
	V ₄	4ª folha totalmente expandida
	V ₆	6ª folha totalmente expandida
	V ₈	8ª folha totalmente expandida
	V ₁₂	12ª folha totalmente expandida
	V ₁₄	14ª folha totalmente expandida
	V _T	Pendoamento – emissão da flor masculina
Reprodutiva	R ₁	Florescimento – emissão da flor feminina
	R ₂	Grão leitoso
	R ₃	Grão pastoso
	R ₄	Grão farináceo
	R ₅	Grão farináceo-duro
	R ₆	Maturidade fisiológica

2.3 Arranjo espacial e densidade de plantas

O arranjo de plantas refere-se a modificações na densidade de plantas, no espaçamento entre linhas e na distribuição de plantas na linha, em que as variações na distância entre plantas na linha e nas entrelinhas atribuem os diferentes arranjos espaciais na lavoura (ALMEIDA JÚNIOR et al., 2018). O arranjo espacial de plantas é uma importante prática no manejo dos cultivos, em virtude da resposta apresentada dos diferentes arranjos na interceptação da radiação solar, que determina o crescimento e desenvolvimento (CARON et al., 2012).

A densidade de plantas afeta diretamente a produtividade de grãos de uma lavoura de milho (KAPPES et al., 2011). A melhor densidade de plantas refere-se a melhor distribuição das plantas em determinada área, a menor competição intraespecífica por água, luz e nutrientes. Em tese, um dos principais objetivos da mudança no arranjo espacial de plantas é reduzir o tempo necessário para a cultura interceptar o máximo de radiação solar possível.

A cultura de milho é altamente sensível à variação na densidade de plantas, que pode variar de 30 mil a 90 mil plantas por hectare, essa diferença depende da disponibilidade hídrica, nível de manejo e da variedade (CRUZ et al., 2006). O aumento na densidade de plantas é uma estratégia empregada para aumentar a interceptação da radiação incidente na cultura de milho. Porém o aumento na densidade pode reduzir a eficiência de alocação de fotoassimilados na espiga e estigmas, estimula a dominância apical e investimento na produção e dispersão de pólen, o que reduz a produção de grãos por planta (SANGOI; SALVADOR, 1998;

EDMEADES et al., 2000). Os híbridos de milho diferem na sua resposta ao aumento da densidade de plantas (MADDONNI et al., 2001) em virtude de diferença na arquitetura do dossel.

A densidade de plantas também pode alterar a distribuição azimutal das folhas. Em plantas de milho as folhas na camada superior do dossel são mais perpendiculares para densidades altas, como exemplo 10 plantas m^{-2} , do que para densidades menores, como exemplo 4 plantas m^{-2} (GIRARDIN; TOLLENAAR, 1994). A competição intraespecífica em milho torna a planta mais efetiva na interceptação de radiação solar (GIRARDIN; TOLLENAAR, 1994).

A produtividade aumenta conforme aumenta a densidade de plantas até atingir um ponto ótimo, que é determinado pela variedade utilizada, em conjunto com as condições climáticas (CRUZ et al., 2006). O arranjo espacial, em especial a densidade de plantas, é a prática de manejo que mais influencia na produtividade de grãos de milho (ALMEIDA JÚNIOR et al., 2018; KAPPES et al., 2011). A densidade de plantas tem maior influência nos órgãos da parte aérea do que o espaçamento entre linhas (NOBEL, 1991).

A produção de grãos por unidade de área (kg ha^{-1}) aumenta linearmente com a maior densidade de plantas até chegar à um ponto de máxima produção por unidade de área, quando há competição intraespecífica, nessa fase a produção por planta decresce e a produção por área apresenta comportamento quadrático (DOURADO NETO et al., 2001). Dessa forma a densidade de plantas ideal é aquela em que se tem maior produção de massa de grãos por área, mesmo que a produção por planta seja menor (Figura 1).

Figura 1. Variação da produção por unidade de planta (g planta^{-1}) e por unidade de área (kg ha^{-1}) em função da densidade de plantas (DOURADO NETO et al., 2001).

Na produção de milho os espaçamentos entre linhas de cultivo não seguem um padrão, e pode variar de 0,45 a 0,90 m (CRUZ et al., 2009). O uso do espaçamento reduzido pode proporcionar maior produtividade de grãos, melhorar a eficiência da planta na interceptação de radiação solar, absorção de nutrientes e água, proporcionar um melhor controle de plantas daninhas pela maior distribuição das plantas (ARGENTA; SILVA; SANGOI, 2001). Contudo, o aumento de plantas por área pode prejudicar alguns componentes de produção, como massa de cem grãos e número de grãos por espiga (DOURADO NETO et al., 2003), reduz o tamanho da espiga e do diâmetro do colmo, bem como pode aumentar o acamamento (CRUZ et al., 2006).

A redução do espaçamento entre linhas, fixado a densidade de plantas, faz que a distância das sementes numa mesma linha seja maior, o que aumenta a distância de plantas na linha, que tende a aumentar a eficiência de absorção dos componentes do ambiente, como água, luz e nutrientes. Em lavouras de milho cultivadas com espaçamento entre linhas de 0,50 e 0,76 m, o espaçamento entre linhas não modificou o índice de área foliar (IAF, $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) máximo (WESTGATE et al., 1997).

O mais eficiente arranjo é aquele que propicia distribuição uniforme de plantas por área, que permite a melhor utilização de luz, água e nutrientes além de outros fatores que influenciam no desenvolvimento (ALMEIDA JÚNIOR et al., 2018). A quantidade de energia convertida em matéria seca depende da porcentagem de absorção e da eficiência da utilização da energia interceptada (ARGENTA; SILVA; SANGOI, 2001). Assim, a escolha do arranjo de plantas

ideal para aumentar a produtividade de grãos de milho tem relação direta com a interceptação de radiação solar, que é o principal fator para a produtividade de grãos, desde que outros fatores como água e nutrientes estejam disponíveis (BRACHTVOGEL et al., 2012).

2.4 Arquitetura da parte aérea

As práticas culturais que melhoram a eficiência da interceptação de luz afetam a arquitetura do dossel modificam o tamanho, orientação, senescência e inserção das folhas (LOOMIS et al., 1968, TETIO-KAGHO; GARDNER, 1988).

A atenuação da luz nas culturas de milho (*Zea mays* L.) é influenciada pela arquitetura do dossel (BOOTE; LOOMIS, 1991), definida em termos de tamanho, forma e orientação dos componentes da parte aérea. O efeito da arquitetura do dossel na atenuação da luz tem sido geralmente simplificado na simulação do crescimento da cultura, com a captura de luz pela cultura geralmente relacionada exclusivamente ao índice de área foliar (IAF, $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) por meio de funções exponenciais (JONES et al., 1986; FLÉNET et al., 1996).

O genótipo escolhido deve expressar suas características morfológicas e fisiológicas no ambiente escolhido para maximizar a produtividade de grãos. A arquitetura foliar é a característica morfológica que mais influencia a resposta do genótipo à densidade de plantas. A arquitetura foliar de uma planta de milho é representada pela interação do número de folhas, ângulo foliar, formato e distribuição ao longo do colmo. A importância de a arquitetura foliar está relacionada com a maximização da interceptação da radiação solar pelo dossel, passo essencial para a obtenção da produtividade potencial (SANGOI et al., 2002).

A arquitetura do dossel de milho é sensível ao arranjo espacial das plantas. Entre os componentes do dossel, o crescimento foliar e a distribuição azimutal são as características mais afetadas pelo arranjo de plantas. Ambos os processos, crescimento e orientação do dossel, são afetados pela percepção das plantas vizinhas antes da ocorrência de sombreamento mútuo significativo, pois as plantas reagem rapidamente ao ambiente de luz (NOBEL, 1991).

A arquitetura do dossel determina o microambiente dinâmico que se forma ao redor das folhas, atua na densidade e composição do fluxo radiante, temperatura do ar, temperatura do solo, pressão de vapor do ar, temperatura da folha, calor armazenado no solo, velocidade do vento, interceptação da precipitação e duração da folha verde (NOBEL, 1991; NORMAN; CAMPBELL, 1989; BEADLE et al., 1985; ROSS, 1981).

A produção de plantas com folhas mais eretas resulta em redução relativa dos custos de produção e manutenção da planta, como exemplo água, nutrientes e assimilados (LOOMIS;

CONNORS, 1992). Da mesma forma, folhas eretas permitem que a luz atinja as folhas inferiores, aumenta a interceptação da luz pelo dossel, que resulta em aumento da fotossíntese pela comunidade vegetal (BEADLE et al., 1985). A mudança da arquitetura foliar na planta de milho pode aumentar sua taxa fotossintética, mesmo em maior densidade de plantas (DWYER et al., 1991). Assim sendo, o incremento da produção de matéria seca de uma cultura está associado ao aumento do nível de radiação interceptado pelo seu dossel (SINCLAIR, 1998).

Existem diferentes taxas de fotossíntese no dossel. As folhas abaixo da espiga são mais velhas e mais sombreadas que aquelas mais altas no dossel e apresentam menores taxas fotossintéticas (DWYER; STEWART, 1986). Folhas próximas da espiga apresentam uma maior taxa fotossintética por um período mais longo que as demais folhas da planta (THIAGARAJAH et al., 1981). Maior penetração de luz até as folhas da espiga pode, portanto, contribuir para maiores taxas de crescimento do milho, que é conseguido através de folhas orientadas mais verticalmente que horizontalmente (LOOMIS; WILLIAMS, 1969).

Para a cultura de milho é desejável um grande número de folhas entre a espiga e o pendão, o que aumenta a interceptação de radiação solar, sendo que essas folhas são responsáveis pelo acúmulo de 50% a 80% da matéria seca dos grãos. (MAGALHÃES et al., 1996). A planta de milho apresenta metabolismo C₄ e isso possibilita que ele tenha uma maior eficiência de conversão luminosa, e menor perda de água na fotorrespiração, sendo importante a distribuição de plantas, o que diminui o auto-sombreamento e melhora o aproveitamento da radiação solar (MAGALHÃES et al., 1996).

Um fator limitante para a capacidade fotossintética e formação de matéria seca da planta do milho é o seu hábito de crescimento, que pode promover sombreamento das folhas inferiores (MAGALHÃES et al., 1996). O pendão da planta que libera o pólen durante a floração, e que se torna dispensável após a floração também pode comprometer a interceptação da radiação solar, pois causa um sombreamento de 19% dependendo do cultivar (MAGALHÃES et al., 1996). Portanto a qualidade da semeadura, e por consequência do estande de plantas é determinante para atingir um bom aproveitamento da radiação solar (MAGALHÃES et al., 1996).

2.5 Radiação solar

A produtividade de uma cultura depende da capacidade da cobertura vegetal de interceptar a radiação incidente, que é uma função da área foliar disponível, da arquitetura da cobertura vegetal e da eficiência de conversão da energia capturada pela planta em biomassa.

A medição da radiação interceptada por uma cultura para formação da área foliar é um fator importante no monitoramento de culturas, estudos de relações hídricas, nutrição e modelos de simulação de culturas (BHATTACHARYA, 2019).

A quantidade de energia solar atingindo uma superfície na terra é dependente da orientação da superfície relativa a posição do sol, e da transmissividade atmosférica (FORSETH; NORMAN, 1995). A posição do sol no céu é determinada pela latitude, dia do ano e horas do dia, ou seja, fatores variáveis. A transmissividade atmosférica é uma função da altitude, nebulosidade e quantidade de partículas, como poluentes, poeira e vapor d'água) no ar (FORSETH; NORMAN, 1995; ALFONSI, 1991).

Os fluxos de radiação em direção a superfície terrestre compõem-se da radiação solar incidente de ondas curtas, direta e difusa, e da radiação de ondas longas. Em contrapartida, a superfície reflete radiação de ondas curtas e ondas longas emitidas para a atmosfera (TANNER; LEMON, 1962). A intensidade com que as ondas curtas são refletidas para o espaço (albedo) varia com o ângulo da incidência solar, grau de cobertura do solo, teor de água no solo e das plantas e tipo e quantidade de cobertura por nuvens (BLAD; BAKER, 1972).

A distribuição difusa representa a parte da radiação que interage com gases e nuvens presentes na atmosfera (GOUDRIAAN; LAAR, 1994). O balanço de energia radiante, também denominada de radiação líquida, vem a ser o saldo de radiação sobre uma superfície (OMETO, 1981). A radiação solar é a única fonte de energia para os processos fisiológicos e bioquímicos que ocorrem nos vegetais. Sendo assim, a produção final de matéria seca de uma planta depende, em última instância, da eficiência com que as folhas convertem energia radiante em energia química, por meio da fotossíntese (ASSIS et al., 1989).

A eficiência do uso da radiação de cultura (RUE, g MJ^{-2}) é uma variável derivada da relação da massa de matéria seca acumulada da cultura (FSa, g m^{-2}) e da radiação absorvida pelo dossel vegetal (PAR_A , $\text{MJ m}^{-2} \text{s}^{-1}$), num intervalo de tempo. RUE é uma medida independente que pode ser usada para descrever o desempenho de culturas e destacar limitações na produtividade.

A forma com que as plantas interceptam e absorvem a radiação solar incidente é uma das características mais importantes, pois essa radiação servirá aos processos de fixação do dióxido de carbono (CO_2) atmosférico em um grupo de moléculas orgânicas mais complexas. Esse processo origina uma entrada de energia livre na biosfera, sendo parte desta armazenada nos assimilados fotossintéticos e parte transferida, durante o processo de respiração, para compostos de alta demanda de energia, que podem ser utilizados na síntese de novos compostos

e no processo de manutenção. O saldo de CO₂ fixado pela planta, ou fotossíntese líquida, é a diferença entre a taxa de fixação bruta e a taxa de perda de CO₂ durante o processo respiratório (JONES, 1994).

Dessa forma, a capacidade fotossintética de uma cultura é determinada por sua capacidade de capturar a luz solar e sua eficiência em convertê-la em assimilação de carbono. Este conceito simples foi abordado por culturas em dois principais componentes de modelagem, a saber, a interceptação de radiação no e a eficiência de uso da radiação nas culturas (RUE) (MONTEITH, 1977).

Monteith (1977) e Biscoe e Gallagher (1977) estabeleceram que a RUE é relacionada quase que linearmente com a radiação fotossinteticamente ativa absorvida (PAR_A). Andrade et al. (1993) evidenciaram que baixas temperaturas podem reduzir a RUE. Contudo, devido à sensibilidade dos cloroplastos, nem toda a radiação solar que atinge as plantas pode ser usada no processo de conversão (ASSIS et al., 1989). A faixa de comprimento de onda da luz utilizada pelas plantas, radiação fotossinteticamente ativa (PAR), estão compreendidos entre os comprimentos de onda de 400 a 700 nm, e esse intervalo compõe 45-50% da radiação solar total (ASSIS et al., 1989).

2.6 Fisiologia da produção

A produtividade máxima de uma cultura, ou produtividade potencial (PP), em uma região irá depender das condições climáticas. Apesar disso, a PP pode ser calculada com boa confiabilidade, para diferentes condições climáticas, por meio de relações que expressam a eficiência da cultura em converter energia solar em produção de matéria seca e, finalmente, em produção comercializável. Isso permite a quantificação do potencial produtivo de diferentes áreas de produção (CAMPELO JÚNIOR et al., 1990).

A fotossíntese, a respiração e a transpiração são processos fisiológicos da planta de milho que resultam diretamente da energia disponível no ambiente, comumente chamada de calor (FANCELLI; DOURADO NETO, 2000). Dessa forma, o aumento da eficiência de conversão possivelmente está relacionado ao maior IAF associado ao maior aproveitamento da radiação difusa disponível nestes arranjos. Por ser multidirecional, a radiação difusa é mais eficiente na penetração do dossel vegetal, quando comparada à direta que é unidirecional causando um auto-sombreamento das folhas inferiores (BURIOL et al., 1995).

Nas espécies C₄, existe uma pequena tendência de a fotossíntese líquida continuar aumentando em função do aumento da densidade do fluxo radioativo, mais do que em plantas C₃. Existem ainda grandes diferenças entre espécies adaptadas à radiação direta e à difusa, ou entre folhas de uma mesma espécie que crescem em irradiâncias diferentes. Nas espécies adaptadas à luz difusa ou em folhas sombreadas, a fotossíntese líquida pode saturar a menos de 100 $\mu\text{mol [PAR] m}^{-2} [\text{folha}] \text{ s}^{-1}$, a qual representa, aproximadamente, 5% da radiação total. As folhas adaptadas à luz direta, por outro lado, frequentemente continuam a responder a valores atípicos para toda luz solar. O ponto de compensação de luz também varia a partir de baixos valores, da ordem de 0,5 a 2,0 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ nas espécies adaptadas à sombra, até valores de 40 $\mu\text{mol [PAR] m}^{-2} [\text{folha}] \text{ s}^{-1}$ nas folhas adaptadas à radiação direta (JONES, 1994). A taxa de assimilação de CO₂ pelas culturas decresce na medida em que ocorre a presença de dias nublados (VAN HEEMST, 1986).

O milho é eficiente na conversão da energia radiante e, conseqüentemente na produção de biomassa, já que multiplica cerca de mil vezes o peso da semente que a originou. A semente contém, em média 0,260 g, após um período de tempo próximo a 135 dias, resulta em cerca de 0,80 a 1,25 kg de biomassa por planta e 0,18 a 0,25 kg de grãos por planta (FANCELLI; DOURADO NETO, 2003). Essa capacidade de desenvolvimento e produção é devida principalmente, ao acúmulo de fotoassimilados que o milho apresenta, em função do seu mecanismo fotossintético tipo C₄. Porém, a fotossíntese e os demais processos fisiológicos e bioquímicos responsáveis pelo desempenho da planta estão intimamente ligados aos fatores abióticos água, luz, temperatura e nutrientes, que devem ser adequados durante todo o ciclo da cultura, para que expresse o seu máximo potencial produtivo.

2.7 Modelagem em agricultura

O uso de modelos na agricultura é datado desde os primeiros cultivos da história da humanidade. Naquele período, já existia um modelo mental de cultivo de uma a cultura de determinada forma e em uma determinada época. Isso foi melhorado com o passar do tempo pelos agricultores, que refinaram o modelo baseando-se em suas próprias experiências e observações. Já no século retrasado, estudiosos como Justus von Liebig e Carl von Wulffen concederam uma abordagem mais estruturada aos modelos, introduzindo o conceito de dinâmica dos sistemas, a partir dos quais seria possível compreender a interdependência de variáveis nos sistemas agrícolas e a ciclagem de nutrientes em função de três parâmetros básicos: quantidade, intensidade e eficiência (DE WIT, 1990).

Os modelos são definidos como um conjunto de equações matemáticas que representam, quantitativamente, as suposições relativas a um sistema real. Esses modelos têm como objetivo o avanço científico com base em uma análise de agregação simplificada e organizada de atributos e processos do mundo real (THORNLEY; JOHNSON, 1990).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Local

O experimento de campo foi conduzido na safra 2018/2019 em um ambiente tropical localizado em Piracicaba, estado de São Paulo, Brazil (22°42'S e 47°38'O, altitude 538m) sob clima subtropical húmido (Cwa segundo a classificação de Köppen) (ALVARES et al., 2013), com precipitação média anual de aproximadamente 1328 mm e temperatura média anual de 21,6°C. O solo da área experimental foi caracterizado como Nitossolo Vermelho Eutroférico de textura argilosa.

3.2 Delineamento experimental

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados em esquema fatorial $2 \times 3 \times 3$, com três repetições. Foram utilizados dois híbridos de milho, DKB 230 (arquitetura foliar ereta) (figura 2) e DKB 390 (arquitetura foliar semiereta) (figura 3) semeados em três espaçamentos (0,25; 0,50 e 1,00 m, E₂₅, E₅₀ e E₁₀₀, respectivamente) e densidades de plantas (40, 70, 100 mil plantas por hectare, D₄₀, D₇₀ e D₁₀₀, respectivamente).

O híbrido DKB 230 possui tecnologia VT PRO3, possuindo resistência para lagartas e ao herbicida glifosato. Seu ciclo é hiperprecoce, possui folhas eretas, bom empalhamento, rápido dry down, excelente resposta ao aumento populacional e boa qualidade de colmo e grãos.

Figura 2. Híbrido 230 VT PRO3 no estágio reprodutivo R2 na segunda safra em Piracicaba, São Paulo.

O híbrido DKB 390 possui tecnologia VT PRO3. Seu ciclo é precoce, possui folhas semi-eretas, bom empalhamento, tolerância ao complexo enfezamento, excelente enraizamento e tolerante ao complexo de mancha branca.

Figura 3. Híbrido 390 VT PRO3 no estágio vegetativo V16 na segunda safra em Piracicaba, São Paulo.

O tamanho das parcelas foi de 24 m² (6 × 4 m). A área útil consistiu de 8,0 m², em que se excluiu um metro de cada extremidade. Ao redor dos blocos, semeou-se sete linhas espaçadas de 0,45 m do híbrido DKB 230 com 70 mil plantas por hectare.

3.3 Tratos culturais

As sementes foram tratadas com clotianidina (neonicotinóide, 600 g L⁻¹) na dose de 80 mL por 60.000 sementes, e também clorantraniliprole (diamida, 625 g L⁻¹) na dose de 72 mL por 60.000 de sementes.

Após a gradagem e abertura de sulcos, o milho foi semeado de forma manual em 15 de janeiro de 2019. A adubação de base foi 20 kg [N] ha⁻¹ e 100 kg [P₂O₅] ha⁻¹ (Fosfato Monoamônico).

Foi realizada a aplicação de herbicida em pré-emergência (S-Metalacloro) com 1,44 L [i.a.] ha⁻¹.

Após a emergência, realizou-se aplicação a lanço de 120 kg [K₂O] ha⁻¹ (KCl). Também foram realizadas duas aplicações a lanço de 100 kg [N] ha⁻¹ (ureia tratada com NBPT) nos estádios fenológicos V₄ e V₆.

Quando as plantas apresentavam três folhas totalmente expandidas, realizou-se o desbaste para obter as densidades de plantas de cada tratamento (Tabela 2).

O manejo fitossanitário foi realizado de forma adequada e proporcionou as melhores condições para o desenvolvimento das plantas.

As irrigações foram realizadas por pivô central com lâmina fixa de 8 mm por irrigada, para tanto calculou-se a evapotranspiração da cultura pelo método de Thornthwaite (1948) e observou a curva de retenção de água do solo. Tudo o que a cultura evapotranspirava, se não houvesse precipitação, era reposta no período noturno pelo sistema de irrigação sempre mantendo o solo próximo a capacidade de campo.

A emergência dos híbridos ocorreu no dia 19 de janeiro e a maturidade fisiológica atingida nos dias 03 e 14 de maio nos híbridos DKB 230 e DKB 390, respectivamente.

3.4 População e espaçamento

Foram utilizadas as populações de 40, 70 e 100 mil plantas por hectare, com espaçamentos entre fileiras de plantas de 0,25; 0,50 e 1,00 m (Tabela 2).

Tabela 2. Número de plantas por metro linear para as diferentes densidades de plantas e espaçamentos. Milho. Safra 2018/2019. Piracicaba, São Paulo.

Espaçamento (m)	0,25	0,50	1,00
Densidade de plantas (plantas ha ⁻¹)	Número médio de plantas por metro linear		
40 mil	1,00	2,00	4,00
70 mil	1,75	3,50	7,00
100 mil	2,50	5,00	10,00

3.5 Avaliações

O diâmetro de colmo, avaliado com paquímetro, e altura de plantas, avaliada com régua milimetrada, foram analisados com base na média de cinco plantas por parcela nos estádios V₁₃, V₁₇ e R₁. O diâmetro de colmo foi avaliado entre o primeiro e segundo nó acima da superfície do solo, enquanto a altura das plantas e espigas foi obtida com base na distância do solo até o final do pendão. A altura de espiga foi mensurada no estádio R₁, com base na distância do solo até a inserção da espiga.

Nos estádios V₈, V₁₃, R₁, R₃ e MF (ponto de maturidade fisiológica) (RITCHIE et al., 1996), avaliou-se a interceptação luminosa e o índice de área foliar (IAF) com o medidor de luz (LAI-250A, LI-COR Inc., Lincoln, Nebraska) e o aparelho analisador de dossel de plantas (LAI-2200, LI-COR Inc., Lincoln, Nebraska), respectivamente. A absorção luminosa foi

avaliada por meio da diferença entre a radiação fotossinteticamente ativa (PAR) global (PAR_O) no topo do dossel menos a PAR refletida (PAR_R) e menos a PAR transmitida (PAR_T). A PAR_O foi avaliada a 0,3 m acima do topo do dossel com o sensor na horizontal voltado para o céu. A PAR_R foi avaliada na mesma posição do PAR_O com o sensor na horizontal voltado para o solo. A PAR_T foi obtida ao nível do solo pela média de oito avaliações medidas no sentido longitudinal e transversal. As avaliações da radiação fotossinteticamente ativa foram realizadas ao meio dia em condições de céu aberto, sem nuvens e o IAF ao entardecer com luminosidade difusa. A PAR absorvida (PAR_A) pelo dossel da planta foi calculada pela diferença:

$$PAR_A = PAR_I - PAR_R - PAR_T,$$

ou em termos relativos:

$$PAR_{AR} = 1 - PAR_{RR} - PAR_{TR}.$$

Os dados de IAF e PAR_A foram ajustados em modelo matemático para determinação do IAF crítico e o IAF máximo. O IAF crítico foi determinado quando o IAF interceptou 90% da PAR_A (GIFFORD; JENKINS, 1982). Com base na derivada da equação entre IAF e PAR_{AR} estimou-se o IAF máximo.

O valor Spad da 13ª folha foi avaliado no 1º, 16º, 24º, 46º, 81º dia após a emissão dessa folha. Em todos os momentos foi avaliada a mesma folha da mesma planta pelo medidor de clorofila Minolta Spad 502 (Konica Minolta), por tanto cada planta e folha foram marcadas com fitas coloridas.

A produtividade de grãos foi obtida por meio da colheita e pesagem dos grãos, de todas as plantas da área útil da parcela (8 m²), com umidade de 23% b.u mensurada pelo equipamento G800 da GEHAKA AGRI. O teor de umidade foi corrigido para 13% b.u (eq. 1) e o peso dos grãos transformados para hectares (ha).

$$Ps (100 - Ud) = Pu (100 - Uo)$$

Onde: Ps = Peso seco

Ud = Umidade desejada

Pu = Peso úmido

Uo = Umidade obtida a campo

O número de grãos por área foi obtido por meio da relação entre a produtividade e a massa de mil grãos.

No ponto de maturidade fisiológica foram analisados, com base na média de avaliação de cinco plantas por parcela, a massa de mil grãos, grãos por planta, grãos por área, espigas por planta e área, fileiras por espiga e grãos por fileira.

Para a determinação do índice de colheita, foi determinado a massa seca, de partes vegetativas e reprodutiva, de cinco plantas por parcelas na maturidade fisiológica. Para a determinação da massa seca foi utilizada estufa da marca SL-102/1152 até as amostras apresentarem massa constante, posteriormente foram pesadas com a balança Toledo 9094. O índice de colheita foi calculado dividindo o peso de grãos pelo peso de massa seca total das plantas (partes vegetativas e reprodutiva).

3.6 Dados meteorológicos

Os dados de precipitação, temperatura e radiação solar (Figura 4) foram obtidos do posto meteorológico da Esalq localizado a 1.100 m do local do experimento. Durante o experimento, a chuva acumulada foi de 412 mm, a irrigação acumulada de 336 mm (Figura 4A) a temperatura média foi de 24,4°C (Figura 2B). A radiação global acumulada foi de 2750 MJ m⁻² e a radiação líquida acumulada foi de 1500 MJ m⁻² (Figura 2C). Os dados de precipitação foram obtidos do Posto Meteorológico “Professor Jesus Marden dos Santos” da ESALQ/USP.

Figura 4. Precipitação (A), temperatura (B) e radiação solar (C). Experimento de milho. Safra 2018/2019. Piracicaba, São Paulo.

3.7 Análise estatística

Os dados coletados foram submetidos à análise de variância (Anova) e testes de normalidade e homogeneidade de distribuição do resíduo. Quando a Anova indicou diferença ou interação entre os fatores ($\alpha = 0,05$), os dados foram submetidos ao teste de Tukey ao nível de 5% de significância para os componentes de produção. O efeito de espaçamento e densidade de plantas para cada híbrido foi analisado por meio de análise de regressão. As avaliações de IAF, Spad e PARa foram analisadas em conjunto como medidas repetidas no tempo. A análise estatística foi realizada através do programa R (Versão 3.0), com auxílio dos pacotes estatísticos *Agricolae*, *ExpDes* e *Laercio*.

4. RESULTADOS

4.1 Diâmetro de colmo, altura de planta e altura de inserção de espiga

No estágio V₁₃ o diâmetro de colmo apresentou diferença entre espaçamentos (Tabela 3), em que E₂₅ e E₅₀ não diferiram entre si (28,7 e 28,8 mm, respectivamente) e apresentaram maior diâmetro que as plantas oriundas de E₁₀₀ (27,5 mm) (Figura 5A). Ainda em V₁₃, o diâmetro do colmo apresentou interação entre híbrido e densidade de plantas (Tabela 3). Desdobrando as densidades de plantas, no híbrido DKB 390 o diâmetro apresentou a seguinte ordem: D₄₀=D₇₀>D₁₀₀, enquanto no híbrido DKB 230 o diâmetro apresentou a seguinte ordem: D₄₀>D₇₀>D₁₀₀. Desdobrando os híbridos, na D₄₀ os híbridos não diferiram entre si, enquanto que em D₇₀ e D₁₀₀ o híbrido DKB 390 apresentou maior diâmetro que o DKB 230 (Figura 5A).

No estágio V₁₇ o diâmetro de colmo apresentou diferença entre híbridos e entre densidades de plantas, sem interação (Tabela 3). Entre as densidades, o diâmetro no estágio V₁₇ apresentou a seguinte ordem: D₄₀>D₇₀>D₁₀₀ (Figura 5A). Entre os híbridos, o diâmetro foi 11,7% maior para DKB 390 em relação ao DKB 230 (Figura 5A).

No estágio R₁ o diâmetro de colmo apresentou interação entre híbridos e densidades de plantas (Tabela 3). Desdobrando as densidades de plantas, no híbrido DKB 390 o diâmetro apresentou a seguinte ordem: D₄₀=D₇₀>D₁₀₀, enquanto no híbrido DKB 230 o diâmetro apresentou a seguinte ordem: D₄₀>D₇₀=D₁₀₀ (Figura 5A). Desdobrando os híbridos, na D₄₀ e D₁₀₀ os híbridos não diferiram entre si, enquanto que em D₇₀ o híbrido DKB 390 apresentou maior diâmetro que o DKB 230 (Figura 5A).

Tabela 3. Significância das variáveis diâmetro de colmo, altura de planta e altura de inserção de espiga pelo teste F, quando submetidas a diferentes espaçamentos, densidades de plantas e híbridos de milho. Safra 2018/2019. Piracicaba, São Paulo.

	Diâmetro do colmo			Altura de planta			Altura da espiga
	V ₁₃	V ₁₇	R ₁	V ₁₃	V ₁₇	R ₁	R ₁
Espaçamento (E)	* 0,014	ns0,213	ns0,319	ns0,255	ns0,160	ns0,232	ns0,745
Densidade (D)	* 0,000	* 0,000	* 0,000	* 0,000	* 0,002	* 0,004	* 0,000
Híbrido (H)	* 0,000	* 0,000	* 0,001	* 0,000	* 0,000	ns0,190	* 0,000
D × E	ns0,063	ns0,669	ns0,639	ns0,732	ns0,667	ns0,689	ns0,567
D × H	* 0,028	ns0,307	* 0,026	ns0,888	ns0,655	ns0,750	ns0,670
E × H	ns0,478	ns0,418	ns0,331	ns0,619	ns0,255	ns0,314	ns0,844
E × D × H	ns0,822	ns0,871	ns0,808	ns0,980	ns0,917	ns0,552	ns0,480

* significativo a 1% pelo teste t; ns não significativo.

No estágio V₁₃ a altura apresentou diferença entre densidade de plantas e híbridos, sem interação (Tabela 3). Entre as densidades, a altura apresentou a seguinte ordem D₄₀<D₇₀<D₁₀₀

(Figura 5B). Entre os híbridos, a altura foi 8.9% menor no DKB 390 em relação ao DKB 230 (Figura 5B).

No estágio V_{17} a altura apresentou diferença entre densidade de plantas e híbridos, sem interação (Tabela 3). Entre as densidades, a altura apresentou a seguinte ordem: $D_{40} < D_{70} = D_{100}$ (Figura 5B). Entre os híbridos, a altura foi 14,3% menor no DKB 390 em relação ao DKB 230 (Figura 5B).

No estágio R_1 a altura apresentou diferença apenas entre densidade de plantas (Tabela 3). Entre as densidades, a altura apresentou a seguinte ordem: $D_{40} < D_{70} = D_{100}$ (Figura 5B).

A altura de inserção da espiga apresentou diferença entre densidade de plantas e híbridos, sem interação (Tabela 3). Entre as densidades, a altura de inserção da espiga apresentou a seguinte ordem: $D_{40} < D_{70} < D_{100}$ (Figura 5B). Entre os híbridos, a altura foi 15,7% maior no DKB 390 em relação ao DKB 230 (Figuras 5B).

Figura 5. Diâmetro de colmo (A), altura de planta (B) e altura de espiga (C) de híbridos de milho (DKB 230 e DKB 390) semeados com diferentes densidades de plantas. Safra 2018/2019. Piracicaba, São Paulo. Letras classificam as médias pelo teste de Tukey a 5% de significância. Quando houve interação, letras minúsculas classificam cultivares, e letras maiúsculas classificam espaçamentos/densidades de plantas.

Figura 6. Diâmetro de colmo (A, B), altura de planta (C, D) e altura de espiga para os híbridos de milho DKB 390 e DKB 230. Safra 2018/2019. Piracicaba, São Paulo.

4.2 Radiação fotossinteticamente ativa absorvida, índice de área foliar e valor Spad

A radiação fotossinteticamente ativa absorvida (PAR_{AR}) e o índice de área foliar avaliados por medidas repetidas no tempo apresentou diferença apenas entre as densidades (Tabela 4). O índice Spad avaliado por medidas repetidas no tempo apresentou diferença entre densidades e híbridos, sem interação (Tabela 4).

Tabela 4. Significância das variáveis radiação fotossinteticamente ativa absorvida relativa (PAR_{AR}), índice de área foliar (IAF) e valor Spad pelo teste F, quando submetidas a diferentes espaçamentos, densidades de plantas e híbridos de milho. Avaliações realizadas em diferentes estádios fenológicos em plantas de milho. Safra 2018/2019. Piracicaba, São Paulo.

<i>p</i> -valor	PAR_{AR}	IAF	Spad
Espaçamento (E)	0,194	0,558	0,847
Densidade (D)	0,000	0,000	0,000
Híbrido (H)	0,541	0,770	0,000
D × E	0,606	0,787	0,224
D × H	0,126	0,393	0,257
E × H	0,199	0,778	0,172
E × D × H	0,557	0,503	0,571

* significativo a 1% pelo teste *t*; - não significativo.

Entre as densidades, a PAR_{AR} e o IAF apresentaram a seguinte ordem: $D_{100} > D_{70} > D_{40}$ (Figuras 7A e 7B) bem como apresentaram ajuste quadrático com o tempo em todas as densidades avaliadas. O índice Spad foi 22,4% maior no híbrido DKB 390 em relação ao híbrido DKB 230, mas o tempo de emissão até a senescência da folha foi bastante similar para ambos os híbridos (Figura 7C). Entre as densidades, o índice Spad apresentou a seguinte ordem $D_{40} > D_{70} > D_{100}$ (Figura 7D).

Com base na relação entre a PAR_{AR} e o IAF determinou-se o IAF crítico, que é o IAF em que a PAR_{AR} atinge 90% (Figuras 7A e 7B). Para os híbridos DKB 390 e DKB 230 o IAF crítico foi de 4,3 e 5,2, respectivamente, e o IAF máximo foi de 4,9 e 5,5, respectivamente (Figuras 7C e 7D). Para ambos os híbridos o IAF na D_{100} excedeu o IAF crítico em todos os espaçamentos.

Figura 7. Radiação fotossinteticamente ativa absorvida relativa (PAR_{AR}) (A), índice de área foliar (B) e valor Spad (C, D) de híbridos de milho (DKB 230 e DKB 390). Safra 2018/2019. Piracicaba, São Paulo.

Com base na relação entre PAR_{AR} e densidade de plantas, a densidade de plantas estimada que proporciona a maior interceptação de luz para os híbridos DKB 390 e DKB 230 foi de 8,93 e 14 plantas m⁻², respectivamente (Figuras 8E e 8F).

Com base na relação entre matéria seca e densidade de plantas, para o híbrido DKB 390 a matéria seca aumentou de forma linear com o aumento da densidade de plantas, não sendo possível estimar um ponto de máxima (Figura 8E). Para o híbrido DKB 230 a matéria seca aumentou de forma quadrática com o aumento da densidade de plantas, com um ponto de máxima em 10 plantas m⁻² (Figuras 8E e 8F).

Figura 8. Relação entre a radiação fotossinteticamente ativa absorvida relativa (PAR_{AR}) e índice de área foliar (IAF) (A, B), dinâmica do índice de área foliar durante o ciclo da cultura (C, D), e relação da PAR_{AR} no pleno florescimento e densidade de plantas (E, F) em dois híbridos de milho. Safra 2018/2019. Piracicaba, São Paulo.

Figura 9. Valor Spad para os híbridos de milho DKB 390 (a) e DKB 230 (b) avaliados da emissão até a senescência da 13ª folha em híbridos de milho (DKB 230 e DKB 390). Safra 2018/2019. Piracicaba, São Paulo.

Figura 10. Radiação fotossinteticamente ativa (A, B) e índice de área foliar (C, D) de híbridos de milho. Safra 2018/2019. Piracicaba, São Paulo.

4.3 Produtividade e componentes de produção

A produtividade apresentou diferença entre densidade de plantas e híbridos, sem interação (Tabela 5). Entre as densidades, a produtividade apresentou a seguinte ordem: $D_{40} < D_{70} = D_{100}$ (Figura 11A). Entre os híbridos, a produtividade foi 16,1% menor para o DKB 390 em relação ao DKB 230 (Figura 11A).

O índice de colheita apresentou interação entre densidade de plantas e híbridos (Tabela 5). Dentro dos híbridos, o índice de colheita no híbrido DKB 390 apresentou a seguinte ordem: $D_{40} = D_{70} > D_{100}$, e no híbrido DKB 230 o índice de colheita não diferiu entre as densidades de plantas (Figura 11B). Dentro das densidades, em D_{40} o índice de colheita foi menor para o DKB 390 em relação ao DKB 230, em D_{70} o índice de colheita não diferiu entre os híbridos e em D_{100} o índice de colheita foi menor em DKB 390 em relação ao DKB 230 (Figura 11B).

Tabela 5. Significância (*p*-valor) das variáveis produtividade (P), índice de colheita (IC), massa de mil grãos (MMG), grãos por área (GA), biomassa seca (MS), espigas por área (EA), grãos por fileira (GF), fileiras por espiga (FE), massa de grãos por planta (MGP), e espigas por planta (EP) oriundo de dois híbridos de milho submetidos a diferentes espaçamentos, densidade de plantas cultivadas. Safra 2018/2019. Piracicaba, São Paulo.

Fator	P	IC	MMG	GA	MS	EA	GF	FE	MGP	EP
Espaçamento (E)	0,958	0,090	0,365	0,266	0,042	0,767	0,805	0,956	0,535	0,843
Densidade (D)	<0,001	0,003	0,425	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,002	<0,001	<0,001
Híbrido	<0,001	<0,001	0,028	0,004	0,313	<0,001	0,150	<0,001	<0,001	<0,001
E × D	0,838	0,613	0,407	0,740	0,735	0,750	0,784	0,641	0,586	0,795
E × H	0,241	0,060	0,727	0,699	0,023	0,968	0,049	0,852	0,328	0,836
D × H	0,942	<0,001	0,519	0,811	0,003	<0,001	0,060	0,975	0,294	<0,001
E × D × H	0,521	0,262	0,617	0,255	0,208	0,375	0,214	0,764	0,489	0,376

Em negrito estão os valores com $p \leq 0,05$.

A massa de mil grãos (MMG) apresentou diferença entre híbridos, sem interação (Tabela 5). Entre os híbridos, a MMG foi 7,5% menor para o DKB 390 em relação ao DKB 230 (Figura 11C).

O número de grãos por área apresentou diferença entre densidade de plantas e híbridos, sem interação (Tabela 5). Entre as densidades, o número de grãos por área apresentou a seguinte ordem: $D_{40} < D_{70} = D_{100}$ (Figura 11A). Entre os híbridos, o número de grãos por área foi 9,8% menor para o DKB 390 em relação ao DKB 230 (Figura 11A).

A massa seca apresentou interação entre espaçamento e híbridos (Tabela 5). Dentro dos híbridos, no híbrido DKB 390 a massa seca apresentou a seguinte ordem $E_{25} > E_{50} = E_{100}$, enquanto que no híbrido DKB 230 a massa seca não diferiu entre os espaçamentos (Figura 11E). Dentro dos espaçamentos, no E_{25} a massa seca foi maior no híbrido DKB 390 em relação ao DKB 230, nos demais espaçamentos os híbridos não diferiram entre si (Figura 11E).

A massa seca também apresentou interação entre densidades de plantas e híbridos (Tabela 5). Dentro dos híbridos, no híbrido DKB 390 a massa seca apresentou a seguinte ordem: $D_{40} < D_{70} < D_{100}$, enquanto que no híbrido DKB 230 a massa seca apresentou a seguinte ordem: $D_{40} < D_{70} = D_{100}$ (Figura 11F). Dentro das densidades de plantas, na D_{40} e na D_{70} a massa seca não diferiu entre os híbridos, e na D_{100} a massa seca foi maior para o híbrido DKB 390 em relação ao DKB 230 (Figura 11F).

Figura 11. Produtividade (A), massa de mil grãos (B), grãos por fileira (C), fileiras por espiga (D), massa de grãos por planta (E) e espigas por planta (F) para os híbridos de milho DKB 390 e DKB 230. Safra 2018/2019. Piracicaba, São Paulo. Letras classificam as médias pelo teste de Tukey a 5% de significância. Quando houve interação, letras minúsculas classificam cultivares, e letras maiúsculas classificam espaçamentos/densidades de plantas.

O número de espigas por área apresentou interação entre densidade de plantas e híbridos (Tabela 5). Dentro dos híbridos, para ambos os híbridos o número de espigas por área apresentou a seguinte ordem: $D_{40} < D_{70} < D_{100}$ (Figura 12A). Dentro das densidades de plantas, na D_{40} e D_{70} o número de espigas por área foi menor para DKB 390 em relação ao DKB 230, e na D_{100} o número de espigas por área não diferiu entre os híbridos (Figura 12A).

O número de grãos por fileira apresentou interação entre espaçamentos e híbridos (Tabela 5). Dentro dos híbridos, para ambos o número de grãos por fileira não diferiu entre os espaçamentos. Dentro dos espaçamentos, no E_{25} o número de grãos por fileira foi maior para o DKB 390 em relação ao DKB 230, para os demais espaçamentos não houve diferença entre os híbridos (Figura 12B).

O número de fileiras por espiga apresentou diferença entre densidade de plantas e híbridos, sem interação (Tabela 5). Entre as densidades, o número de fileiras por espiga apresentou a seguinte ordem: $D_{40}=D_{70}<D_{100}$ (Figura 12C). Entre os híbridos, o número de fileiras por espiga foi 13,3% maior no DKB 390 em relação ao DKB 230 (Figura 12C).

A massa de grãos por planta apresentou diferença entre as densidades de plantas e híbridos, sem interação (Tabela 5). Entre as densidades, a massa de grãos por planta apresentou a seguinte ordem: $D_{40}>D_{70}>D_{100}$ (Figura 12D). Entre os híbridos, a massa de grãos por planta foi menor para o DKB 390 em relação ao DKB 230 (Figura 12D).

O número de espigas por planta apresentou interação entre densidade de plantas e híbridos (Tabela 5). Dentro dos híbridos, para o DKB 390 o número de espigas por planta apresentou a seguinte ordem: $D_{40}>D_{70}=D_{100}$, enquanto que o híbrido DKB 230 apresentou a seguinte ordem $D_{40} > D_{70} > D_{100}$ (Figura 12E). Dentro das densidades, na D_{40} e na D_{70} o número de espigas por planta foi menor no DKB 390 em relação ao DKB 230, e em D_{100} não houve diferença entre os híbridos (Figura 12E).

A relação entre produtividade e densidade de plantas entre os híbridos apresentou um ajuste quadrático para o híbrido: DKB 390 ($y=-0,0024.x^2+0,3884.x-5,1611$; $R^2=0,67$) e linear para DKB 230 ($y = 0.0685x + 5.6277$; $R^2=0,66$) (Figura 12F). Com base nesse ajuste, determinou-se a densidade de plantas que proporcionou a maior produtividade para o híbrido DKB 390 foi 8,1 plantas m^{-2} e para o híbrido DKB 230 foi 10 plantas m^{-2} .

Figura 12. Espigas por área (A), grãos por fileira (B), fileiras por espiga (C), massa de grãos por planta (D), espigas por planta (E) e estimativa de densidade ótima (F) para os híbridos de milho DKB 390 e DKB 230 cultivadas na safra 2018/2019 em Piracicaba, São Paulo, Brasil. Letras classificam as médias pelo teste de Tukey a 5% de significância. Quando houve interação, letras minúsculas classificam cultivares, e letras maiúsculas classificam espaçamentos/densidades de plantas.

Figura 13. Produtividade (A), massa de mil grãos (B), grãos por fileira (C), fileiras por espiga (D), massa de grãos por planta (E) e espigas por planta (F) para os híbridos de milho DKB 390 e DKB 230. Safra 2018/2019. Piracicaba, São Paulo.

5. DISCUSSÃO

5.1 Diâmetro de colmo, altura de planta e altura de inserção de espiga

De 4 para 10 plantas m^{-2} para ambos os híbridos DKB 390 e DKB 230 aumentaram a altura de plantas e a altura de inserção da espiga, contudo reduziu o diâmetro de colmo das plantas (Figuras 5 e 6). Estes resultados corroboram com outros autores, que citam que o diâmetro de colmo é influenciado de maneira inversa pela densidade de plantas (ALMEIDA JÚNIOR et al., 2018; DEMÉTRIO et al., 2008; STACCIARINI et al., 2010; SANGOI et al., 2002; BRACHTVOGEL et al., 2009).

Para o híbrido DKB 390 cultivado em ambiente tropical, o aumento da densidade de 5 a 8 plantas m^{-2} reduziu o diâmetro do colmo de forma linear (SANTOS et al. 2018). A proporção com que o diâmetro de colmo é reduzido depende das características intrínsecas de cada material genético, no experimento o DKB 230 apresentou menor diâmetro de colmo do que o DKB 390 em altas populações.

A baixa interferência do espaçamento nas variáveis analisadas está de acordo com Skonieski et al. (2014), que avaliaram espaçamentos de 0,40, 0,60 e 0,80 m entre linhas e da mesma forma não observaram diferenças na altura de plantas, altura de inserção da espiga e no diâmetro de colmo. Estas informações também corroboram com Pereira et al. (2017) e Afféri et al. (2008).

Maiores densidades de plantas tendem a aumentar a altura de plantas (CALONEGO et al., 2011). O adensamento de plantas pode ocasionar maior competição intraespecífica pela luz, o que resulta em maior crescimento em altura em detrimento ao crescimento radial do colmo (STACCIARINI et al. 2010; CALONEGO et al., 2011).

Alterações como altura de planta, da espiga e diâmetro de colmo são respostas fisiológicas diretas das plantas ao ambiente em que estão submetidas. Plantas que estão em maiores densidades sofrem maior competição intra-específica, percebida pelas folhas desde os primeiros estádios fenológicos pela proporção de vermelho e vermelho distante no fitocromo (TAIZ; ZEIGER, 2013). Também alteram o metabolismo e promove o crescimento em altura, para aumentar a captação de luz (TAIZ; ZEIGER, 2013).

5.2 Radiação fotossinteticamente ativa absorvida, índice de área foliar e valor Spad

Maiores densidades de plantas de milho aumentaram o IAF e absorção da PAR no dossel das plantas, bem como reduziu o valor Spad (Figura 9). Da mesma forma, maior IAF e maior absorção da PAR_A foi observada no estágio de pendoamento (estádio fenológico R₁) quando as plantas possuíam maior número de folhas, contando ainda com as folhas do baixeiro.

Sangoi et al. (2005) verificaram aumento linear do IAF com o aumento da densidade de plantas de milho. Com o IAF maior, uma planta tende a ter mais interferência ou competição intraespecífica além de proporcionar maior custo de manutenção (LOOMIS; CONNORS, 1992).

Segundo Gardner et al. (1985), a cultura de milho necessita de IAF oscilando entre 4 e 5 para otimizar o aproveitamento da radiação solar sob condições hídricas e edáficas favoráveis. Outros autores citam que a interceptação de luz de 95% no milho ocorre com IAF de 4,9, sendo este o valor máximo que as plantas deveriam atingir a campo (MADDONNI et al., 2001; WESTGATE, 1997). Nem sempre maior IAF significa maior aproveitamento da PAR_{AR}, pois depende da eficiência de conversão de energia luminosa das plantas do dossel.

O período de maior interceptação da radiação deve ocorrer entre a polinização até grão leitoso, que deve resultar da melhor combinação entre IAF e interceptação da PAR_{AR} (VIEIRA et al., 2016). A eficiência de interceptação da radiação solar na cultura de milho é de praticamente 100% quando a cultura está em estágio reprodutivo com índice de área foliar superior a 5 (MÜLLER; BERGAMASCHI, 2005).

A interceptação da PAR_{AR} e IAF no dossel decresce após o pendoamento, após esta etapa grande parte dos fotoassimilados são destinados para a produção de grãos, o que explica o início da senescência das folhas do baixeiro (Figura 10). Alguns híbridos apresentam maior senescência de folhas do baixeiro (PEREIRA et al., 2017) e outros menor senescência (SANGOI et al., 2013), devido às características intrínsecas de cada material genético.

De maneira inversa ao IAF, o valor Spad reduziu com o aumento da densidade de plantas, e esta redução foi diferente entre os híbridos. O híbrido DKB 390 apresentou maior valor Spad do que o híbrido DKB 230, esta constatação pode ser justificada pelo fato do primeiro ser mais tardio e menos eficiente na translocação de nutrientes das folhas para a espiga.

A diminuição do índice Spad com o aumento da densidade de plantas está relacionada com a pouca radiação interceptada pelo baixeiro, portanto quanto maior o IAF menor radiação chegará naquelas folhas o que diminuirá a produção de fotoassimilados. O decaimento da

participação das folhas do baixeiro na produção de fotoassimilados é variada de acordo com a características das folhas do híbrido. Em materiais com folhas eretas, como o DKB 230, a luz tem facilidade em penetrar no dossel e atingir, com maiores intensidades, as folhas inferiores fazendo com que o baixeiro das plantas tenha uma maior participação na produção de fotoassimilados total quando comparado a híbridos de folhas semi-eretas (DKB 390). Nesse híbrido a radiação que chega à parte inferior em menor intensidade por ser atenuada pelas folhas superiores.

O aumento da densidade de plantas aumenta o IAF e a PAR_{AR} . As associações destes parâmetros aumentam a eficiência da conversão nestes arranjos espaciais. Por ser multidirecional, a radiação difusa é mais eficiente em penetrar o dossel vegetal quando comparado à radiação direta, e dessa forma, alcança as folhas inferiores (BURIOL et al., 1995).

No híbrido DKB 390 o IAF necessário para interceptar 90% da PAR ($4,3 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$) foi menor do que o híbrido DKB 230 ($5,2 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$). Esse por apresentar folhas eretas necessita de mais plantas por hectares para interceptar a mesma radiação de híbridos com folhas semi-eretas, pois a luz tem maior capacidade de penetração.

Para a cultura da soja há maior eficiência de conversão com maior número de plantas por área, que apresentou maior índice de área foliar e possivelmente maior interceptação de radiação difusa, assim aumentou a eficiência de conversão e produtividade de soja (CARON et al., 2019).

A radiação solar é a principal fonte de energia para a atividade biológica das plantas. A maneira como a planta é capaz de interceptar e absorver a radiação solar global e a radiação fotossinteticamente ativa determinará o seu rendimento, uma vez que estão diretamente ligadas à capacidade de realização de fotossíntese (KUNZ et al., 2007).

5.3 Produtividade e componentes de produção

Neste estudo a melhor a densidade de plantas com maior produtividade para o híbrido DKB 390 foi $8,1 \text{ plantas m}^{-2}$ (Figura 13) corroborando com Sangoi et al. (2005). Já o híbrido DKB 230 apresentou maior produtividade para a densidade de $10 \text{ plantas m}^{-2}$. A diferença entre a maior produtividade entre diferentes densidades de plantas de milho está relacionada, principalmente, ao aumento do número de grãos por área (SANTOS et al., 2018).

O número de espigas por planta reduziu 62% com o aumento da densidade de 40 para 100 mil plantas ha^{-1} . O número de espigas por planta apresentou interação entre densidade e

híbrido porque o híbrido DKB 230 apresentou redução mais acentuada em relação ao híbrido DKB 390 nas maiores densidades de plantas (Figura 11F).

No estudo de Sangoi et al. (2013) o híbrido testado também apresentou resposta quadrática quanto a produtividade de grãos nas densidades de 2,5; 5,0; 7,5; 10 e 12,5 plantas m^{-2} . A maior produção obtida pelos autores foi de 12.663 kg ha^{-1} , com a densidade de 7,5 plantas m^{-2} , entretanto a densidade ótima calculada pela equação ajustada foi de 8,6665 plantas m^{-2} .

Outro estudo obteve a maior produtividade com a densidade de semeadura de 8,25 plantas m^{-2} (PEREIRA et al., 2017). Dessa forma, a maior produtividade de grãos com a alteração no arranjo de plantas, através da redução do espaçamento entre linhas e do adensamento de plantas tem sido estratégias frequentemente reportadas na literatura (CALONEGO et al., 2011; STACCIARINI et al., 2010; TAKASU et al., 2014).

A maior densidade de plantas é uma estratégia para aumentar a interceptação da radiação solar incidente pela comunidade de plantas de milho, potencializando seu uso e, conseqüentemente, a produtividade de grãos (DEMÉTRIO et al., 2008).

O aumento da produtividade de grãos está relacionado ao quanto a planta foi capaz de assimilar e exportar seus fotoassimilados para os grãos, e desta forma conseguimos observar que o híbrido de angulação foliar ereta, DKB 230, teve maior produtividade quando comparado ao DKB 390, de folhas semieretas.

A maior interceptação luminosa no híbrido DKB 390, com população de 8,9 plantas m^{-2} , não resultou na maior produtividade, uma vez que essa foi obtida com 8,1 plantas m^{-2} . Nem sempre a maior interceptação de PAR fornece maior fotossíntese líquida, pois com o aumento populacional também há maiores gastos na respiração (Figura 8E). Desse modo, há um limite ótimo entre a absorção de radiação e perda por respiração que para esse híbrido foi obtido na população que interceptou 90% da PAR.

No híbrido DKB 230, a população que mais produziu foi com 10 plantas m^{-2} , não sendo possível, nesse experimento, determinar o ponto de inflexão da produtividade. Através dos modelos gerados (Figura 8B e 8F) observou que na população de 10 plantas m^{-2} a radiação absorvida foi de 90% e resultou na maior produtividade. Foi visto que para esse híbrido a matéria seca por hectares aumentou de forma quadrática, contudo, ele apresenta a característica de ter maior eficiência na translocação de fotoassimilados para os grãos (maior índice de

colheita) e menos gastos por respiração quando comparado ao DKB 390 na mesma população. O aumento populacional naquele híbrido é mais satisfatório do que para esse híbrido.

A angulação foliar ereta permitiu maior interceptação luminosa nas folhas inferiores e menor sombreamento, o que fez com que as mesmas permanecessem mais tempo viáveis como fontes, e não como drenos. Além disso, folhas eretas reduzem o auto-sombreamento, e por consequência contribuiu para a maior produtividade do híbrido DKB 230.

No entanto, angulações semieretas permite maior número de folhas na entrelinha e conseqüentemente, maior auto-sombreamento. Quando o dossel apresenta maior auto-sombreamento torna-se normal a senescência precoce das folhas, o que reduz folhas-fontes produtoras de fotoassimilados, reduz a produtividade final e dessa forma, o que pode ter ocorrido com o híbrido DKB 390.

As densidades avaliadas não influenciaram na MMG, contudo, os híbridos DKB 230 apresentou maior MMG quando comparado com o DKB 390. O fato do híbrido DKB 230 apresentar menor número de fileiras por espiga é compensado pelo aumento da massa de grãos e do número de espigas por planta, o que justifica sua maior produtividade.

O que pode ter favorecido para que a MMG apresentasse o mesmo potencial em todas as densidades foi porque as plantas foram irrigadas e não estiveram sujeitas ao *deficit* hídrico. Em outro estudo sem irrigação foi observado redução da MMG com o aumento da densidade de plantas (DEMÉTRIO et al., 2008), o que pode estar atrelado ao fator estresse hídrico.

O aumento da densidade de plantas reduziu o número de espigas planta⁻¹ para ambos os híbridos, o que corrobora com outros estudos (CALONEGO et al., 2011; PEREIRA et al., 2017; SANTOS et al., 2018; DOURADO NETO et al., 2003).

Em outro estudo, a maior massa de grãos por espiga e MMG foram observadas na densidade de 5 plantas m⁻², e decresceu em densidades maiores (SANTOS et al., 2018). Esses autores citam que a menor densidade de plantas reduziu a competição entre as plantas por água e nutrientes, além de menor sombreamento, o que evidencia que as plantas direcionam seus fotoassimilados para a produção de grãos.

Maior densidade de plantas diminui a massa seca por planta e por espigas, e como consequência produz menor número de grãos por espiga (SANGOI et al., 2005). O adensamento de plantas, acima do valor considerado ótimo, por vezes pode causar esterilidade na espiga pelo desencontro na diferenciação da espiga em relação à diferenciação do pendão (SANGOI et al., 2000).

Em lavouras com maior densidade de plantas e sob boas condições de crescimento, as espigas adicionais resultarão em maior produtividade de grãos, por aumentar o número de grãos por área. Porém, essa compensação ocorre até que o maior número de espigas por área não seja mais suficiente para compensar a redução do número e da massa dos grãos (DOURADO NETO et al., 2003).

O espaçamento entre plantas não influenciou em grande parte dos componentes de produção, biometria, absorção de radiação, índice de área foliar, senescência foliar e produtividade (Tabela 3, 4, 5), pois as condições edafoclimáticas do ambiente de produção foram ótimas e fez com que a variação na competição intraespecífica entre as plantas, nos diferentes espaçamentos, fossem minimizadas a ponto de arranjos com plantas melhores distribuídas apresentassem o mesmo comportamento daqueles com piores distribuição de plantas com mesma densidade populacional. Observando esse fato inferimos que em ambientes de produção de sequeiro e com um nível tecnológico baixo, os resultados podem variar com os diferentes espaçamentos.

6. CONCLUSÕES

A produtividade aumentou com o aumento populacional para ambos os híbridos, porém nem sempre a maior interceptação da radiação no milho significa maior rendimento de grãos. No híbrido DKB 230 a população de 10 plantas m^{-2} foi a que mais produziu, já para o DKB 390 foi de 8,1 plantas m^{-2} . Para o DKB 390 a maior produtividade não necessariamente está ligada a maior absorção de radiação fotossinteticamente ativa, pois o aumento populacional excessivo aumenta também a perda de energia por respiração, para esse híbrido o limiar ótimo de interceptação da PAR é de 90% com área foliar de 4.3 $\text{m}^{-2} \text{m}^{-2}$ de solo. Já o DKB 230, por ser de angulação foliar ereta, o que facilita a penetração luminosa, apresentou a maior produtividade na maior população, pois é um híbrido muito eficiente na translocação de fotoassimilados das partes vegetativas para as reprodutivas. No experimento não foi possível detectar o ponto de inflexão da produtividade desse híbrido.

O híbrido DKB 230 quando comparado ao DKB 390, na mesma densidade de plantas, interceptou menos radiação por suas folhas serem eretas o que facilita a passagem de luz para a parte inferior do dossel da cultura, desse modo o IAF crítico foi de 5.2, já híbridos de folhas semi-eretas (DKB 390) a passagem de luz é dificultada, portanto apresentam maior interceptação luminosa em relação a híbridos de folhas eretas quando em um mesmo IAF.

Por apresentar maior peso de mil grãos e grãos por área o DKB 230 é mais produtivo que o DKB 390.

Os espaçamentos entre as linhas não afetaram a produtividade, absorção da radiação fotossinteticamente ativa, índice de área foliar, índice Spad, índice de colheita, massa de mil grãos, grãos por área, espigas por área, fileiras por espiga, massa de grãos por planta, espigas por área, altura de planta e altura de espiga, quando a condição edafoclimática do ambiente de produção são ótimas, pois a variação nas competições intraespecífica decorrentes dos diferentes espaçamentos foram nulas contudo variaram apenas pela alteração da densidade populacional.

REFERÊNCIAS

- AFFÉRRI, F.S.; MARTINS, E.P.; PELUZIO, J.M.; FIDELIS, R.R.; RODRIGUES, V.M. Row spacing and sowing densities for late cropping maize in the Tocantins state, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.38, n.2, p.128, 2008.
- ALFONSI, R.R. Agrometeorologia: importância e aplicações. CPG-Fitotecnia, Piracicaba: Esalq/USP. 1991. 23p.
- ALMEIDA JÚNIOR, J.J.; SMILJANIC, K.B.A.; MATOS, F.S.A.; MIRANDA, B.C.; OLIVEIRA, D.M.; CAMARGO, H.A. Características agronômicas e produtividade na cultura do milho plantado com diferentes populações na região de mineiros estado de Goiás. **Nucleus**, v.15, p.475-483, 2018.
- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, n.6, p.711-728, 2013.
- ANDRADE, F.H.; UHART, S.A.; CIRILO, A. Temperature affects radiation use efficiency in maize. **Field Crops Research**, v.32, p.17-25, 1993.
- ARGENTA, G.; SILVA, P.R.F.; SANGOI, L. Arranjo de plantas em milho: análise do estado-da-arte. **Ciência Rural**, v.31, p.1075-1084, 2001.
- ASSIS, F.N.; MENDEZ, M.E.G. Relação entre radiação fotossintética ativa e radiação global. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.2, p.797-800, 1989.
- BARET, F.; MADEC, S.; IRFAN, K.; LOPEZ, J.; COMAR, A.; HEMMERLÉ, M.; DUTARTRE, D.; PRAUD, S.; TIXIER, M.H. Leaf-rolling in maize crops: from leaf scoring to canopy-level measurements for phenotyping. **Journal of Experimental Botany**, v.69, n.10, p.2705-2716, 2018.
- BEADLE, C.L.; LONG, S.P.; IMBAMBA, S.K.; HALL, D.O.; OLEMBO, R.J. **Photosynthesis in relation to plant production in terrestrial environments**. London: Tycooly/Cassel, 235p. 1985.
- BHATTACHARYA, A. **Effect of high temperature on crop productivity and metabolism of macro molecules**. Academic Press. 2019.
- BISCOE, P.U.; GALLAGHER, J.N. Weather, dry matter production and yield. In: LANDSBER, J.J.; CUTTING, C.U. (Ed.). **Environmental effects on crop physiology**. London: Academic Press, 1977, 198p.
- BLAD, B.L.; BAKER, D.G. Orientation and Distribution of Leaves Within Soybean Canopies 1. **Agronomy Journal**, v.64, p.26-29, 1972.
- BOOTE, K.J.; LOOMIS, R.S. The prediction of canopy assimilation. In: **Modeling crop photosynthesis - from biochemistry to canopy**, v.19, p.109-140. 1991.
- BRACHTVOGEL, E.L.; PEREIRA, F.R.S.; CRUZ, S.C.S.; ABREU, M.L.; Bicudo, S.J. População, arranjo de plantas uniforme e a competição intraespecífica em milho. **Revista Trópica - Ciências Agrárias e Biológicas**, v.6, p.75-83, 2012.

BURIOL, G.A.; STRECK, N.A.; PETRY, C.; SCHNEIDER, F.M. Transmissividade à radiação solar do polietileno de baixa densidade utilizado em estufas. **Ciência Rural**, v.25, p.1-4, 1995.

CALONEGO, J.C.; POLETO, L.C.; DOMINGUES, F.N.; TIRITAN, C.S. Produtividade e crescimento de milho em diferentes arranjos de plantas. **Agrarian**, v.4, p.84-90, 2011.

CAMPELO JÚNIOR, J.H.; CASEIRO, F.T.; HERBSTER, O.F. **Zoneamento do potencial de produção de grãos em Mato Grosso**. Cuiabá, UFMT, 30p. 1990.

CARON, B.O.; ROCKENBACH, A.P.; SCHMIDT, D.; ENGROFF, T.D.; SCHWERZ, F.; SCHNEIDER, J.R. Conversion efficiency of photosynthetically active radiation for soybean cultivations in spatial arrangements. **Journal of Agricultural Science**, v.11, p.213-220, 2019.

CARON, B.O.; SOUZA, V.Q.D.; TREVISAN, R.; BEHLING, A.; SCHMIDT, D.; BAMBERG, R.; ELOY, E. Eficiência de conversão da radiação fotossinteticamente ativa interceptada em fitomassa de mudas de eucalipto. **Revista Árvore**, v.36, p.833-842, 2012.

CARON, B.O.; SOUZA, V.Q.D.; TREVISAN, R.; BEHLING, A.; SCHMIDT, D.; BAMBERG, R.; ELOY, E. Eficiência de conversão da radiação fotossinteticamente ativa interceptada em fitomassa de mudas de eucalipto. **Revista Árvore**, v.36, p.833-842, 2012.

COELHO, A.M.; CRUZ, J.C.; PEREIRA FILHO, I.A. Rendimento do milho no Brasil: chegamos ao máximo. **Informações Agronômicas**, v.101, p.1-12, 2003.

CONAB. **Acompanhamento da Safra Brasileira Grãos**. 2020. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/grãos/boletim-da-safra-de-grãos>>. Acesso em 16 de junho de 2020.

CRUZ, J.C.; GARCIA, J.C.; PEREIRA FILHO, I.A.; PINTO, L.; QUEIROZ, L. **Caracterização dos sistemas de produção de milho para altas produtividades**. Embrapa Milho e Sorgo-Circular Técnica (Infoteca-E). 2009.

CRUZ, J.C.; PEREIRA FILHO, I.A.; ALVARENGA, R.C.; GONTIJO NETO, M.M.; VIANA, J.H.M.; DE OLIVEIRA, M.F.; SANTANA, D.P. **Manejo da cultura do milho**. Embrapa Milho e Sorgo-Circular Técnica (Infoteca-E). 2006.

DE WIT, C.T. Understanding and managing changes in agriculture. In: **Systems theory applied to agriculture and the food chain**. Elsevier London, UK, 1990.

DEMÉTRIO, C.S.; FORNASIERI FILHO, D.; CAZETTA, J.O.; CAZETTA, D.A. Desempenho de híbridos de milho submetidos a diferentes espaçamentos e densidades populacionais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.43, p.1691-1697, 2008.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. Efeito da água no rendimento das culturas. Tradução de H.R. GHEYI; DE SOUZA, A.A.; DAMASCO, F.A.V.; DE MEDEIROS, J.F. Campina Grande: UFPB, 306p. 1994. (FAO. Irrigação e drenagem, 33).

DOURADO NETO, D.; FANCELLI, A.L.; LOPES, P.P. Milho: população e distribuição de plantas. In: **Milho: tecnologia da produtividade**. Piracicaba: Esalq, p.120-125, 2001.

DOURADO NETO, D.; VIEIRA, P.A.; MANFRON, P.A.; PALHARES, M.; MEDEIROS, S.L.P.; ROMANO, M.R. Efeito da população de plantas e do espaçamento sobre a produtividade de milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.2, p.63-77, 2003.

DWYER, L.M.; STEWART, D.W. Effect of leaf age and position on net photosynthetic rates in maize (*Zea mays* L.). **Agricultural and Forest Meteorology**, v.37, p.29-46, 1986.

DWYER, L.M.; TOLLENAR, M.; STEWART, D.W. Changes in plant density dependence of leaf photosynthesis of maize (*Zea mays* L.) hybrids, 1959 to 1988. **Canadian Journal of Plant Science**, v.71, p.1-11, 1991.

EDMEADES, G.O.; BOLANOS, J.; ELINGS, A.; RIBAUT, J.M.; BÄNZIGER, M.; WESTGATE, M.E. The role and regulation of the anthesis-silking interval in maize. In: **Physiology and modeling kernel set in maize**. Physiologyandmo, p.43-73, 2000.

EVERS, J.B.; BASTIAANS, L. Quantifying the effect of crop spatial arrangement on weed suppression using functional-structural plant modelling. **Journal of Plant Research**, v.129, p.339-351, 2016.

FANCELLI, A.L.; DOURADO NETO, D. Milho: estratégias de manejo para alta produtividade. Piracicaba: ESALQ/USP/LPV, 2003.

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

FAO, 2020. Crops and livestock products [<http://www.fao.org/faostat/en/#data/TP>]. (accessed on 16 June 2020).

FERREIRA, L.L.; ARAÚJO, G.S.; CARVALHO, I.R.; SANTOS, G.A.; FERNANDES, M.S.; CARNEVALE, A.B.; CURVÊLO, C.R.S.; PEREIRA, A.I.A. (2019). Cause and Effect Estimates on Corn Yield as a Function of Tractor Planting Speed. **Journal of Experimental Agriculture International**, 41, 1-7.

FAWCETT, J., SIEVERS, J., DEJONG, J., ROSSITER, L. (2017). On-Farm Corn and Soybean Planter Trials: Farm Progress Reports. **Farm Progress Reports, Iowa**, 112, 45-49.

FLÉNET, F.; KINIRY, J. R.; BOARD, J. E.; WESTGATE, M. E.; REICOSKY, D. C. (1996). Row spacing effect on light extinction coefficient of corn, sorghum, soybean, and sunflower. **Agronomy Journal**, 88, 185-190.

FORSETH, I.N.; NORMAN, J.M. Modelling of solar irradiance, leaf energy budget, and canopy photosynthesis. In **Techniques in Photosynthesis and Productivity Research for a Changing Environment** (ed. D. O. HALL, J. M. O. SCURLOCK, R. C. BOLHAR-NORDENKAMPF, R. C. LEEGOOD; S. P. LONG). Chapman; Hall, London, UK. 1995.

GARDNER, F.P.; PEARCE, R.G.; MITCHELL, R.L. **Physiology of crop plants**. Ames: Iowa State University, 1985. 327p.

GIFFORD, R.M.; JENKINS, C.L.D. Prospects of applying knowledge of photosynthesis toward improving crop production. In: **Photosynthesis: development, carbon metabolism, and plant productivity**, GOVINDJEE (Ed.), v.2, p.419-457. 1982.

GIRARDIN, P.H.; TOLLENAAR, M. Effects of intraspecific interference on maize leaf azimuth. **Crop science**, v.34, n.1, p.151-155, 1994.

GOUDRIAAN, J.; VAN LAAR, H.H. **Modelling potential crop growth processes. Current issues in production ecology**. Kluwer Academic Publishers, v.10, p.978-994, 1994.

GROSS, M.R. **Adubação nitrogenada, densidade de semeadura e espaçamento de fileiras na cultura de milho em sistema plantio direto**. 68f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2005.

HANASHIRO, R.K.; MINGOTTE, F.L.C.; FORNASIERI FILHO, D. Desempenho fenológico, morfológico e agrônômico de cultivares de milho em Jaboticabal-SP. **Científica**, v.12, p.58-59, 2015.

JONES, C.A.; KINIRY, J.R.; DYKE, P. CERES–Maize a simulation model of Maize growth and development. Texas A & M. A & M University Press. College Station, Texas. 1986.

JONES, H.G. **Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology**. Cambridge university press, 428p. 1994.

KAPPES, C. **Desempenho de híbridos de milho em diferentes arranjos espaciais de plantas**. 2010. 127f. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Unesp, Campus Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2010.

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

KINIRY, J.R.; BONHOMME, R. Predicting maize phenology. In: HODGES, C. (Ed.). **Predicting crop phenology**. Boca Raton: CRC Press, p.115-131, 1991.

KUNZ, H.K.; BERGONCI, J.I.; BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; HECKLER, B. M.; COMIRAN, F. Uso da radiação solar pelo milho sob diferentes preparos do solo, espaçamento e disponibilidade hídrica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 11, p. 1511-1520, nov. 2007.

LOOMIS, R.S.; CONNORS, D.J. **Crop ecology: productivity and management in agricultural systems**. Cambridge University, 550p. 1992.

LOOMIS, R.S.; WILLIAMS, W.A. Productivity and morphology in crop stands: patterns with leaves. In: EASTIN, J.O.; HASKINS, Z.A.; SULLIVAN, O.G.; VAN BASVEL, C.H.M. (Ed.). **Physiological Aspects of Crop Yields**. Madison: American Society of Agronomy, 230p. 1969.

LOOMIS, R.S.; WILLIAMS, W.A.; DUNCAN, W.G.; DOVRAT, A.; NUNEZ, F.A. Quantitative descriptions of foliage display and light absorption in field communities of corn plants. **Crop Science**, v.8, p.352-356, 1968.

MADDONNI, G.A.; OTEGUI, M.E.; CIRILO, A.G. Plant population density, row spacing and hybrid effects on maize canopy architecture and light attenuation. **Field Crops Research**, v.71, p.183-193, 2001.

MAGALHÃES, P.C.; DURÃES, F.O.M; GOMIDE, R.L. **Fisiologia da cultura do milho**. Embrapa Milho e Sorgo-Capítulo em livro científico (ALICE). 1996.

MONTEITH, J.L. Climate and the efficiency of crop production in Britain. **Transaction Royal Society of London Botany**, v.281, p.277-294. 1977.

MÜLLER, A.G.; BERGAMASCHI, H. Efficiency of interception, absorption, and photosynthetically active radiation use in maize crops (*Zea mays* L.) submitted to different water conditions and dry matter estimation by energetic model. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.13, p.27-33, 2005.

NOBEL, P.S. Achievable productivities of certain CAM plants: basis for high values compared with C₃ and C₄ plants. **New Phytologist**, v.119, p.183-205, 1991.

NORMAN, J.M.; CAMPBELL, G.S. Canopy structure. In: Plant physiological ecology. Springer, Dordrecht, p.301-325, 1989.

OMETO, J.C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Ceres, 1981, 440p.

OSU - OHIO STATE UNIVERSITY. **Corn production**. (Bulletin, 472). 2003. Disponível em <<http://www.ohioline.osu.edu/b472/front.html>> Acesso em 20 de dezembro de 2018.

PALHARES, M. **Distribuição e população de plantas e produtividade de grãos de milho**. 2003, 90f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2003.

PEREIRA FILHO, I.A.; CRUZ, J.C. **Plantio**. Embrapa Milho e Sorgo. Sistema de produção, 1. 2004.

PEREIRA, L.B.; MACHADO, D.S.; ALVES FILHO, D.C.; BRONDANI, I.; SILVA, V.; ARGENTA, V.; MOURA, A.F.; BORCHATE, D. Características agronômicas da planta e produtividade da silagem e grãos de milho submetido a diferentes arranjos populacionais. **Magistra**, v.29, p.18-27, 2017.

RIBEIRO, S.S. Cultura de milho no Brasil. Semana acadêmica, 1. **Revista Científica**, 2014.

RITCHIE, S.W.; HANWAY, J.J.; BENSON, G.O. **How a corn plant develops**. Ames: Iowa State University of Science and Technology, 1996. 20 p. (Special Report, 48).

ROSS, J. The radiation regime and architecture of plant stands. Hague: W. Junk, 1981. 240p.

SANGOI, L.; ALMEIDA, M.L.; GRACIETTI, M.A.; HORN, D.; SCWEITZER, C.; SCHMITT, A.; BIANCHET, P. Rendimento de grãos, produção e distribuição de massa seca de híbridos de milho em função do aumento da densidade de plantas. **Revista Brasileira de Agrociência**, v.11, n.1, p.25-31, 2005.

SANGOI, L.; ALMEIDA, M.L.; SILVA, P.R.F.; ARGENTA, G. Bases morfofisiológicas para a maior tolerância dos híbridos modernos de milho a altas densidades de plantas. **Bragantia**, v.61, p.101-110, 2002.

SANGOI, L.; ENDER, M.; GUIDOLIN, A.F.; BOGO, A.; KOTHE, D.M. Incidência e severidade de doenças de quatro híbridos de milho cultivados com diferentes densidades de plantas. **Ciência Rural**, v.30, p.17-21, 2000.

SANGOI, L.; SALVADOR, R.J. Influence of plant height and leaf number on maize production at high plant densities. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.33, p.297-306, 1998.

SANGOI, L.; ZANIN, C.G.; SCHMITT, A.; VIEIRA, J. Senescência foliar e resposta de híbridos de milho liberados comercialmente para cultivo em diferentes épocas ao adensamento. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.12, p.21-32, 2013.

SANTOS, A.L.F.; MECI, I.A.; RIBEIRO, L.M.; CECCON, G. Eficiência fotossintética e produtiva de milho safrinha em função de épocas de semeadura e populações de plantas. **Revista de Agricultura Neotropical**, v.5, p.52-60, 2018.

SHER, A.; KHAN, A.; CAI, L.J.; AHMAD, M.I.; ASHARF, U.; JAMORO, S.A. Response of maize grown under high plant density; performance, issues and management - a critical review. **Advanced Crop Science Technology**, v.5, p.2-8, 2017.

SILVA, P.R.F.; SANGOI, L.; ARGENTA, G.; STRIEDER, M.L. **Arranjo de plantas e sua importância na definição da produtividade em milho**. Porto Alegre: Evangraf, 2006. 64p.

SINCLAIR, T.R. Historical changes in harvest index and crop nitrogen accumulation. **Crop Science**, v.38, p.638-643, 1998.

SKONIESKI, F.R.; NÖRNBERG, J.L.; KESSLER, J.D.; DAVID, D.B.D.; AZEVEDO, E.B.D.; BRÜNING, G.; PIMENTEL, C.M. M. Corn plant arrangement and its effect on silage quality. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.43, p.114-119, 2014.

STACCIARINI, T.D.C.V.; CASTRO, P.H.C.D.; BORGES, M.A.; GUERIN, H.F.; MORAES, P.A.C.; GOTARDO, M. Avaliação de caracteres agronômicos da cultura do milho mediante a redução do espaçamento entre linhas e aumento da densidade populacional. **Revista Ceres**, v.57, p.516-519, 2010.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. Fisiologia vegetal. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 954p.

TAKASU, A.T.; RODRIGUES, R.A.F.; GOES, R.J.; ARF, O.; HAGA, K.I. Agronomic performance of corn under different arrangements population and row spacing. **Revista Agrarian**, v.7, p.34-41, 2014.

TANNER, C.B.; LEMON, E.R. Radiant energy utilized in evapotranspiration 1. **Agronomy Journal**, v.54, p.207-212, 1962.

TETIO-KAGHO, F.; GARDNER, F.P. Responses of maize to plant population density. II. Reproductive development, yield, and yield adjustments. **Agronomy Journal**, v.80, p.935-940, 1988.

THIAGARAJAH, M.R.; HUNT, L.A.; MAHON, J.D. Effects of position and age on leaf photosynthesis in corn (*Zea mays*). **Canadian Journal Botany**, v.59, p.28-33, 1981.

THORNLEY, J.H.M.; JOHNSON, I.R. A mathematical approach to plant and crop physiology. A mathematical approach to plant and crop physiology, 1990. 669p.

VAN HEEMST, H. D. J. Physiological principles. In: VAN KEULEN, H.; WOLF, J. Modelling of agricultural production: weather, soils and crops. Wageningen: Pudoc, p.13-26. 1986.

VEGA, C.R.C.; ANDRADE, F.H.; SADRAS, V.O.; UHART, S.A.; VALENTINUZ, O.R. Seed number as a function of growth. A comparative study in soybean, sunflower, and maize. **Crop Science**, v.41, p.748-754, 2001.

VIEIRA, L.C.; BARBOSA-NETO, J.F.; GUERRA, M.P. Análise preliminar de germoplasma de variedades crioulas de milho do sul do Brasil. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.15, p.557-571, 2016.

WESTGATE, M.E.; FORCELLA, F.; REICOSKY, D.C.; SOMSEN, J. Rapid canopy closure for maize production in the northern US corn belt: radiation-use efficiency and grain yield. **Field Crops Research**, v.49, p.249-258, 1997.

WIECHERS, D.; KAHLEN, K.; STÜTZEL, H. Evaluation of a radiosity based light model for greenhouse cucumber canopies. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 151, p. 906-915, 2011.

ZHAI, L.C.; XIE, R.Z.; LI, S.K.; FAN, P.P. Relationship between population competitive intensity and yield in maize cultivars. **Journal of Integrative Agriculture**, v.16, p.1312-1321, 2017.