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

**Avaliação da eficiência climática e da performance agrícola da cultura de
soja**

Guilherme Felisberto

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

**Piracicaba
2020**

Guilherme Felisberto
Engenheiro Agrônomo

Avaliação da eficiência climática e da performance agrícola da cultura de soja
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

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

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

Piracicaba
2020

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

Felisberto, Guilherme

Avaliação da eficiência climática e da performance agrícola da cultura de soja / Guilherme Felisberto. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011.- -Piracicaba, 2020.

99 p.

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

1. *Glycine max* (L.) Merrill 2. Índice de fotoperíodo 3. Índice térmico 4. Deficiência hídrica 5. Sistema de produção I. Título

Aos meus pais, Edino Aparecido Felisberto e Elisabete Frutuoso Felisberto, pelo amor, carinho, compreensão, confiança, apoio e por, através da luta diária de vocês, me oferecerem a oportunidade de seguir em frente nos estudos.

Com todo amor, respeito, admiração e gratidão,

Aos meus filhos João Luiz e Ana Rosa.

Com todo amor do mundo,

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente e acima de todas as coisas, agradeço a Deus por sempre me abençoar com graças diárias e pela vida, que a mim, o Senhor proporciona, concedendo-me saúde, uma família abençoada, amigos inestimáveis e oportunidades.

Nem com todas as palavras do dicionário seria capaz, mas gostaria aqui de agradecer meu pai Edino e minha mãe Elisabete, por absolutamente tudo. Vocês são meus pilares, meus exemplos de luta e dedicação diária, meu porto seguro, vocês são tudo para mim. Amo vocês.

Gostaria de agradecer, também de forma especial, minha vó Lourdes e meu vó Antônio, pelos ensinamentos de educação e caráter passados a mim. Amo muito vocês!

Agradeço, de maneira muito especial, meu irmão Gustavo e toda minha família (tios, tias, primos e primas), que sempre me apoiaram e me deram forças.

Agradeço também o professor, orientador e amigo Prof. Dr. Durval Dourado Neto, por todo o apoio, amizade, orientação, conselhos, confiança, respeito e conhecimentos transmitidos.

Agradeço também a todos do GFASP (Grupo de Fisiologia Aplicada e Sistemas de Produção. Obrigado pela dedicação e apoio no trabalho e por todos os momentos de descontração e, acima de tudo, muito obrigado pela amizade de cada um de vocês. Que juntos possamos ainda colher muitos frutos de nossa parceria e trabalho duro.

Meu grande amigo Felipe, muito obrigado, acima de tudo, pela amizade e companheirismo, também por toda a disposição e ajuda diária, nos tropeços e nas conquistas!

Com enorme carinho, gostaria de agradecer meus amigos: Adilson, Ananias, Antônio Neto, Antônio Pereira, César, Claudinei, Cláudio, Daniel, David, Edson Moraes, Erreinaldo, Helena, João Rodrigues, José dos Reis, Osvaldo, Rodrigo, Horst, Aparecido, Tino e Wilson, que tanto me ajudaram na realização diária do trabalho e também pelas inúmeras conversas e risadas.

Pessoal do Laboratório Multiusuário em Produção Vegetal: muito obrigado por toda a vivência, apoio (dentro e fora das questões acadêmicas).

Gostaria de agradecer também ao professor: Dr. Klaus Reichardt (Cena) e ao Dr. Renan Caldas Umburanas, pela ajuda, valiosos conselhos e sugestões em minha pesquisa.

Agradeço, também carinhosamente, a Luciane, secretária da PPG Fitotecnia, que tanto me ajudou desde o dia da minha matrícula. Muito obrigado pelo carinho e por todo o amor em que você ajuda a todos os alunos.

Gostaria de agradecer a CNPq, pelo auxílio financeiro para a realização do mestrado.

Também a todos meus amigos de São João da Boa Vista (SP) e Lavras (MG) (principalmente meus irmãos da República Berro Grosso), que para não esquecer de nenhum nome, não vou citá-los. Muito obrigado pelas, sempre calorosas, boas vindas e pela amizade que se perdura ao longo do tempo.

Gostaria de agradecer a todas as amizades que conquistei aqui em Piracicaba, de maneira especial aos irmãos da República Área 51, por me receberem e por estarem sempre presentes, nos momentos bons e ruins. Muito obrigado pelos momentos de descontração e divertimento, com certeza sem vocês, minha passagem por Piracicaba seria muito mais difícil.

“Conheça o mundo, mas nunca se esqueça do quintal da sua casa”.

Autor desconhecido

SUMÁRIO

RESUMO.....	10
ABSTRACT	11
LISTA DE FIGURAS	12
LISTA DE TABELAS.....	13
1 INTRODUÇÃO	23
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1 A CULTURA DE SOJA	25
2.1.1 Fenologia	27
2.1.2 Ecofisiologia	28
2.1.3 Data de semeadura e produtividade	33
2.1.4 Produtividade atingível	35
2.2 BALANÇO HÍDRICO	36
2.3 EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL DE REFERÊNCIA.....	37
2.4 HORAS DE BRILHO SOLAR	37
2.5 EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL DA CULTURA	38
2.6 CAPACIDADE DE ÁGUA DISPONÍVEL.....	38
2.7 ÁGUA DISPONÍVEL.....	38
2.8 EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL.....	38
2.9 DEFICIÊNCIA HÍDRICA	39
2.10 CARACTERIZAÇÃO DO AMBIENTE DE PRODUÇÃO	39
3 MATERIAL E MÉTODOS	41
3.1 PRODUTIVIDADE DE SOJA	41
3.1.1 Produtividade potencial de soja	41
3.1.2 Produtividade obtenível	42
3.1.3 Eficiência climática.....	42
3.1.4 Eficiência edafoclimática	43
3.1.5 Eficiência agrícola	43
3.1.6 Eficiência do uso de fotoperíodo.....	43
3.1.7 Eficiência de otimização de temperatura.....	43

3.1.8	Eficiência dos elementos do clima definidores de produtividade potencial.....	44
3.2	EXPERIMENTOS DE CAMPO	45
3.2.1	Experimentos realizados.....	45
3.2.2	Clima	45
3.2.3	Solo	45
3.2.4	Cultivares.....	46
3.2.5	Delineamento experimental.....	47
3.2.6	Eficiência de performance agrícola.....	47
3.2.7	Eficiência edáfica.....	48
3.2.8	Eficiência de manejo agrícola.....	49
3.2.9	Eficiência de adequação do genótipo.....	50
3.2.10	Índice de área foliar.....	50
3.2.11	Massa de matéria seca de parte aérea	51
3.2.12	Massa de mil grãos.....	51
3.2.13	População de plantas	51
3.2.14	Altura de inserção da primeira vagem	51
3.2.15	Altura de planta	51
3.2.16	Componentes de produtividade	52
3.2.17	Produtividade	52
3.2.18	Fenologia	52
3.2.19	Análise estatística	52
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
4.1	PRODUTIVIDADE POTENCIAL DA CULTURA DE SOJA.....	53
4.1.1	Eficiência climática	66
4.1.2	Eficiência edafoclimática.....	66
4.1.3	Eficiência agrícola	67
4.1.4	Eficiência do uso de fotoperíodo	68
4.1.5	Eficiência de otimização de temperatura	75
4.1.6	Eficiência dos elementos do clima definidores de produtividade potencial.....	81
4.2	EXPERIMENTOS DE CAMPO	81
4.2.1	Eficiência edáfica.....	81
4.2.2	Índice de suficiência hídrica	82

4.2.3	Índice de suficiência de nutrientes minerais	82
4.2.4	Eficiência de manejo agrícola	83
4.2.5	Produtividade obténível	83
4.2.6	Produtividade real.....	84
4.3	AVALIAÇÃO DO GENÓTIPO	85
4.3.1	Temperatura mínima e máxima	85
4.3.2	Chuva	86
4.3.3	Índice de área foliar	88
4.3.4	Massa de matéria seca de parte aérea	89
4.3.5	Altura de inserção da primeira vagem	90
4.3.6	Altura de planta.....	91
4.3.7	Componentes da produtividade.....	92
5	CONCLUSÕES	94
	REFERÊNCIAS	96

RESUMO

Avaliação da eficiência climática e da performance agrícola da cultura de soja

O presente trabalho tem por objetivo propor uma metodologia para avaliar a eficiência de performance agrícola (E_{PA}) por intermédio da eficiência climática (E_C), eficiência edáfica (E_E) e eficiência de manejo (E_M) em diferentes sistemas de produção da cultura de soja na safra de verão utilizando os diferentes indicadores: (i) fatores de definição climática estimados pela eficiência do uso de dióxido de carbono (CO_2) (E_{CO_2}), eficiência do uso de fotoperíodo (duração teórica do dia) (E_H), eficiência do uso maximizado de luz (maximização do uso de radiação solar fotossinteticamente ativa absorvida) (E_L), e eficiência de otimização de temperatura (E_T); (ii) fatores limitantes estimados pelo índice de suficiência hídrica (água) (I_w) e índice de suficiência de nutrientes minerais (I_N); e (iii) fatores de manejo estimados pelo índice de adequação de genótipo (I_G), índice de definição da época de semeadura (I_S), e índice de adequação de população e distribuição de plantas (I_P). Para tal, foram conduzidos dois experimentos de campo, contemplando quatro cultivares, na safra 2017/2018, em Piracicaba-SP, para determinação dos indicadores de performance do modelo. Nos estudos de caso de produtividade potencial, foram considerados os seguintes cultivares: (i) safra 2016/17 (sistema de produção irrigado em Piracicaba-SP e sequeiro em Leme-SP): (1) BMX-Elite-RR (ciclo precoce/hábito de crescimento indeterminado), (2) TMG-7161-RR (precoce/indeterminado), (3) TMG-7262-RR (precoce/semideterminado), (4) BMX-Garra-RR (precoce/indeterminado), (5) TMG-1264-RR (precoce/indeterminado), (6) BMX-Potência-RR (médio/indeterminado), (7) TMG-1067-RR (médio/determinado), (8) BMX-Ícone-RR (médio/indeterminado), (9) BMX-Power-RR (médio/indeterminado), (10) BMX-Raça-RR (tardio/indeterminado), (11) TMG-1179-RR (tardio/determinado) e (12) TMG-1180-RR (tardio/semideterminado); e (ii) safra 2017/18 (irrigado e sequeiro em Piracicaba-SP): (1) BMX-Ativa-RR (precoce/determinado), (2) BMX-Lança-RR (precoce/indeterminado), (3) BRS-GO-7460-RR (médio/determinado) e (4) BMX-Desafio-RR (médio/indeterminado). O método proposto pressupõe a diminuição da produtividade potencial da cultura de soja nos seguintes casos: (i) elevada nebulosidade (o aumento da nebulosidade resulta em uma menor eficiência de fotoperíodo); (ii) elevado desvio entre a temperatura do ar do ambiente de produção e a temperatura ótima (27,9°C) da cultura de soja; e (iii) elevado desvio entre o índice de área foliar máximo determinado experimentalmente e o índice de área foliar máximo ótimo (5,29 m² m⁻²).

Palavras-chave: *Glycine max*, Índice de fotoperíodo, Índice térmico, Deficiência hídrica, Sistema de produção

ABSTRACT

Evaluation of climatic efficiency and agricultural performance of soybean crops

The present work aims to propose a methodology to evaluate the efficiency of agricultural performance (E_{PA}) through climatic efficiency (E_C), edaphic efficiency (E_E) and management efficiency (E_M) in different soybean production systems in the summer harvest using different indicators: (i) climatic definition factors estimated by the efficiency of the use of carbon dioxide (CO_2) (E_{CO_2}), efficiency of the use of photoperiod (theoretical duration of the day) (E_H), efficiency of the maximized use of light (maximization of the use of absorbed photosynthetically active solar radiation) (E_L), and temperature optimization efficiency (E_T); (ii) limiting factors estimated by the water sufficiency index (water) (I_w) and mineral nutrient sufficiency index (I_N); and (iii) management factors estimated by the genotype adequacy index (I_G), sowing time definition index (I_S), and population adequacy and plant distribution index (I_P). Two field experiments were carried out, covering four cultivars. Two field experiments were carried out, covering four cultivars, in the 2017/2018 season, in Piracicaba-SP, to determine the model's performance indicators. In the potential productivity case studies, the following cultivars were considered: (i) 2016/2017 season (under irrigation in Piracicaba-SP and without irrigation in Leme-SP): (1) BMX-Elite-RR (precocious cycle and indeterminate habit), (2) TMG-7161-RR (precocious and indeterminate), (3) TMG-7262-RR (precocious and semideterminate), (4) BMX-Garra-RR (precocious and indeterminate), (5) TMG-1264-RR (precocious and indeterminate), (6) BMX-Potência-RR (medium and indeterminate), (7) TMG-1067-RR (medium and determinate), (8) BMX-Ícone-RR (medium and indeterminate), (9) BMX-Power-RR (medium and indeterminate), (10) BMX-Raça-RR (late and indeterminate), (11) TMG-1179-RR (late and determinate) and (12) TMG-1180-RR (late and semideterminate); and (ii) 2017/18 season (under irrigation and without irrigation in Piracicaba-SP): (1) BMX-Ativa-RR (precocious and determinate), (2) BMX-Lança-RR (precocious and indeterminate), (3) BRS-GO-7460-RR (medium and determinate) and (4) BMX-Desafio-RR (medium and indeterminate). The proposed method assumes a decrease in the potential productivity of the soybean crop in the following cases: (i) high cloudiness (the increase in cloudiness results in a lower photoperiod efficiency); (ii) high deviation between the air temperature of the production environment and the optimum temperature (27.9°C) of the soybean crop; and (iii) high deviation between the maximum leaf area index determined experimentally and the maximum maximum leaf area index (5.29 m² m⁻²).

Keywords: *Glycine max*, Photoperiod index, Thermic index, Water deficit, Production system

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Comparativo entre as áreas nacionais de produção de soja e de condição hídrica geral (destaque para a parcela da área produtiva sujeita a restrições por falta de chuva: região amarela no mapa inferior) (CONAB, 2017). 26
- Figura 2 - Grupos de maturação dos cultivares de soja utilizados no Brasil em função da latitude de cultivo e a distribuição das áreas produtoras de soja no Brasil em 1970, 1980 e 2003. Fonte: Embrapa (2011). 32
- Figura 3 - Valores de produtividade potencial (P_p , kg ha⁻¹) em função da (A) duração do ciclo (DC, d) e do (B) índice de colheita (IC, kg kg⁻¹). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Safra 2016/2017. Piracicaba-SP. 56
- Figura 4 - Valores de produtividade potencial (P_p , kg ha⁻¹) em função da (A) duração do ciclo (DC, d) e do índice de colheita (IC, kg kg⁻¹). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Safra 2016/2017. Leme, SP. 57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Descrição dos estádios fenológicos da cultura de soja (FEHR; CAVINESS, 1977).....	27
Tabela 2 - Duração do ciclo da cultura de soja, em dias, pela classificação precoce, semiprecoce, médio, semitardio e tardio para diferentes estados do Brasil.	31
Tabela 3 - Duração total do ciclo, em dias, em função do grupo de maturação e macrorregião de cultivo de soja, associada aos grupos de ciclo utilizados no zoneamento agrícola.....	33
Tabela 4 - Caracterização dos experimentos realizados no Departamento de Produção Vegetal da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq) da Universidade de São Paulo (USP), em Piracicaba, SP: data de semeadura, descrição e número de cultivares. Safra 2017/2018.	45
Tabela 5 - Resultados da análise química: pH (CaCl_2), teor de matéria orgânica (M.O., g dm^{-3}), teor de macronutrientes (P, mg dm^{-3}) (K, Ca, Mg, H+Al, Al, $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$), soma de bases (S, $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$), capacidade de trocas catiônica (CTC, $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$), saturação por bases (V, %), saturação por alumínio (m, %), e teor enxofre (SO_4 , mg dm^{-3}). Departamento de Produção Vegetal da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq) da Universidade de São Paulo (USP), em Piracicaba, SP. Safra 2017/2018.	46
Tabela 6 - Resultados da análise química de micronutrientes (Cu, Fe, Zn, Mn e B, mg dm^{-3}), e física (argila, silte, areia total, areia grossa e areia fina, g kg^{-1}). Departamento de Produção Vegetal da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq) da Universidade de São Paulo (USP), em Piracicaba, SP. Safra 2017/2018.	46
Tabela 7 -Valores de eficiência de performance agrícola (E_{PA}) e respectivas classes sugeridas para classificação. Departamento de Produção Vegetal da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq) da Universidade de São Paulo (USP), em Piracicaba, SP. Safra 2017/2018.	48
Tabela 8 - Índice de deficiência de fertilidade do solo (I_{DF} , %) (adaptado de LANDELL et al., 2004).....	49

Tabela 9 - Valores estimados de produtividade potencial (P_p , kg ha^{-1}) em função do índice de área foliar máximo (IAFx , $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$), temperatura do ar (T , $^{\circ}\text{C}$), insolação (n , h d^{-1}), duração do ciclo (DC , d) e índice de colheita (IC , kg kg^{-1}). Sistemas de produção (SP): irrigado (I) e sequeiro (S). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, SP (I) e Fazenda Cabeceira do Taquari, Leme, SP (S). Safra 2016/2017.	55
Tabela 10 - Valores de temperatura média (T , $^{\circ}\text{C}$) e insolação (n , h d^{-1}). Ambientes de produção 1 a 3. Piracicaba-SP. Posto agrometeorológico. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Safra 2016/2017.....	58
Tabela 11 - Valores de temperatura média (T , $^{\circ}\text{C}$) e insolação (n , h d^{-1}). Ambientes de produção 4 a 6. Leme-SP. Posto agrometeorológico. Fazenda Cabeceira do Taquari. Safra 2016/2017.	59
Tabela 12 - Valores de temperatura média (T , $^{\circ}\text{C}$) e insolação (n , h d^{-1}). Ambientes de produção 7 e 8. Piracicaba-SP. Posto agrometeorológico. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Safra 2017/2018.....	60
Tabela 13 - Produtividade potencial da cultura de soja em função do fotoperíodo (N , h d^{-1}), insolação (n , h d^{-1}) (igual ao fotoperíodo), temperatura (T , $^{\circ}\text{C}$) (igual à temperatura ótima da cultura de soja), índice de área foliar máximo (IAFx , $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) (igual ao índice de área foliar máximo ótimo) e duração do ciclo (DC , d). Ambiente de produção 1. Cultivar TMG-7161-RR. Safra 2016/2017. Piracicaba, SP (Latitude: -22,725°).	61
Tabela 14 - Produtividade potencial da cultura de soja em função do fotoperíodo (N , h d^{-1}), insolação (n , h d^{-1}) (igual ao fotoperíodo), temperatura (T , $^{\circ}\text{C}$) (igual à temperatura ótima da cultura de soja), índice de área foliar máximo (IAFx , $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) (igual ao índice de área foliar máximo ótimo) e duração do ciclo (DC , d). Ambiente de produção 2. Cultivar TMG-7161-RR. Safra 2016/2017. Leme, SP (Latitude: -22,1892°).	62
Tabela 15 - Produtividade potencial da cultura de soja em função do fotoperíodo (N , h d^{-1}), insolação (n , h d^{-1}) (igual ao fotoperíodo), temperatura (T , $^{\circ}\text{C}$) (igual à temperatura ótima da cultura de soja), índice de área foliar máximo (IAFx , $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) (igual ao índice de área foliar máximo ótimo) e duração do ciclo (DC , d). Ambiente de produção 3. Cultivares BMX-Potência-RR, TMG-1067-RR, BMX-Ícone-RR e BMX-Power-RR. Safra 2016/2017. Piracicaba, SP (Latitude: -22,725°).	63

- Tabela 16 - Produtividade potencial da cultura de soja em função do fotoperíodo (N , $h\ d^{-1}$), insolação (n , $h\ d^{-1}$) (igual ao fotoperíodo), temperatura (T , $^{\circ}C$) (igual à temperatura ótima da cultura de soja), índice de área foliar máximo ($IAFx$, $m^2\ m^{-2}$) (igual ao índice de área foliar máximo ótimo) e duração do ciclo (DC , d). Ambiente de produção 4. Cultivares BMX-Potência-RR, TMG-1067-RR, BMX-Ícone-RR e BMX-Power-RR. Safra 2016/2017. Leme, SP (Latitude: $-22,1892^{\circ}$). 64
- Tabela 17 - Produtividade potencial da cultura de soja em função do fotoperíodo (N , $h\ d^{-1}$), insolação (n , $h\ d^{-1}$) (igual ao fotoperíodo), temperatura (T , $^{\circ}C$) (igual à temperatura ótima da cultura de soja), índice de área foliar máximo ($IAFx$, $m^2\ m^{-2}$) (igual ao índice de área foliar máximo ótimo) e duração do ciclo (DC , d). Ambiente de produção 5. Cultivar BMX-Ativa-RR. Safra 2017/2018. Piracicaba, SP (Latitude: $-22,725^{\circ}$). 65
- Tabela 18 - Valores estimados de eficiência climática (E_C , $kg\ kg^{-1}$) em função da produtividade potencial (P_P , $kg\ ha^{-1}$), produtividade obtível (P_i , $kg\ ha^{-1}$), índice de área foliar máximo ($IAFx$, $m^2\ m^{-2}$), temperatura do ar (T , $^{\circ}C$), insolação (n , $h\ d^{-1}$), duração do ciclo (DC , d) e índice de colheita (IC , $kg\ kg^{-1}$). Sistemas de produção (SP): irrigado (I). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, SP (P). Safras 2016/2017 e 2017/2018. 66
- Tabela 19 - Valores estimados de eficiência edafoclimática (E_E , $kg\ kg^{-1}$) em função da produtividade real (P_R , $kg\ ha^{-1}$), produtividade real (P_R , $kg\ ha^{-1}$), índice de área foliar máximo ($IAFx$, $m^2\ m^{-2}$), temperatura do ar (T , $^{\circ}C$), insolação (n , $h\ d^{-1}$), duração do ciclo (DC , d) e índice de colheita (IC , $kg\ kg^{-1}$). Sistemas de produção (SP): sequeiro (S). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, SP (P) e Fazenda Cabeceira do Taquari, Leme, SP (L). Safras 2016/2017 e 2017/2018. 67

- Tabela 20 - Valores estimados de eficiência agrícola (E_A , kg kg^{-1}) em função da produtividade obtenível (P_L , kg ha^{-1}), produtividade real (P_R , kg ha^{-1}), índice de área foliar máximo ($IAFx$, $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$), temperatura do ar (T , $^{\circ}\text{C}$), insolação (n , h d^{-1}), duração do ciclo (DC , d) e índice de colheita (IC , kg kg^{-1}). Sistemas de produção (SP): irrigado (I) e sequeiro (S). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, SP (I) e Fazenda Cabeceira do Taquari, Leme, SP (S). Safra 2016/2017. 68
- Tabela 21 - Valores estimados de eficiência do uso de fotoperíodo (E_F , kg kg^{-1}) em função da produtividade potencial (P_p , kg ha^{-1}), produtividade potencial deplecionada pela insolação (P_{pn} , kg ha^{-1}), índice de área foliar máximo ($IAFx$, $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$), temperatura do ar (T , $^{\circ}\text{C}$), insolação (n , h d^{-1}), duração do ciclo (DC , d) e índice de colheita (IC , kg kg^{-1}). Sistemas de produção (SP): irrigado (I) e sequeiro (S). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, SP (I) e Fazenda Cabeceira do Taquari, Leme, SP (S). Safras 2016/2017 e 2017/2018. 69
- Tabela 22 - Produtividade potencial deplecionada pela insolação (P_{pn} , kg ha^{-1}) da cultura de soja em função do fotoperíodo (N , h d^{-1}), insolação (n , h d^{-1}) (igual ao fotoperíodo), temperatura (T , $^{\circ}\text{C}$) (igual à temperatura ótima da cultura de soja), índice de área foliar máximo ($IAFx$, $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) (igual ao índice de área foliar máximo ótimo) e duração do ciclo (DC , d). Ambiente de produção 1. Cultivar TMG-7161-RR. Safra 2016/2017. Piracicaba, SP (Latitude: $-22,725^{\circ}$). 70
- Tabela 23 - Produtividade potencial deplecionada pela insolação (P_{pn} , kg ha^{-1}) da cultura de soja em função do fotoperíodo (N , h d^{-1}), insolação (n , h d^{-1}) (igual ao fotoperíodo), temperatura (T , $^{\circ}\text{C}$) (igual à temperatura ótima da cultura de soja), índice de área foliar máximo ($IAFx$, $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) (igual ao índice de área foliar máximo ótimo) e duração do ciclo (DC , d). Ambiente de produção 2. Cultivar TMG-7161-RR. Safra 2016/2017. Leme, SP (Latitude: $-22,1892^{\circ}$). 71
- Tabela 24 - Produtividade potencial deplecionada pela insolação (P_{pn} , kg ha^{-1}) da cultura de soja em função do fotoperíodo (N , h d^{-1}), insolação (n , h d^{-1}) (igual ao fotoperíodo), temperatura (T , $^{\circ}\text{C}$) (igual à temperatura ótima da cultura de soja), índice de área foliar máximo ($IAFx$, $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) (igual ao índice de área foliar máximo ótimo) e duração do ciclo (DC , d). Ambiente de produção 3. Cultivares BMX-Potência-RR, TMG-1067-RR, BMX-Ícone-RR e BMX-Power-RR. Safra 2016/2017. Piracicaba, SP (Latitude: $-22,725^{\circ}$). 72

- Tabela 25 - Produtividade potencial deplecionada pela insolação (P_{Pn} , kg ha^{-1}) da cultura de soja em função do fotoperíodo (N , h d^{-1}), insolação (n , h d^{-1}) (igual ao fotoperíodo), temperatura (T , $^{\circ}\text{C}$) (igual à temperatura ótima da cultura de soja), índice de área foliar máximo ($IAFx$, $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) (igual ao índice de área foliar máximo ótimo) e duração do ciclo (DC , d). Ambiente de produção 4. Cultivares BMX-Potência-RR, TMG-1067-RR, BMX-Ícone-RR e BMX-Power-RR. Safra 2016/2017. Leme, SP (Latitude: $-22,1892^{\circ}$). 73
- Tabela 26 - Produtividade potencial deplecionada pela insolação (P_{Pn} , kg ha^{-1}) da cultura de soja em função do fotoperíodo (N , h d^{-1}), insolação (n , h d^{-1}) (igual ao fotoperíodo), temperatura (T , $^{\circ}\text{C}$) (igual à temperatura ótima da cultura de soja), índice de área foliar máximo ($IAFx$, $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) (igual ao índice de área foliar máximo ótimo) e duração do ciclo (DC , d). Ambiente de produção 5. Cultivar BMX-Ativa-RR. Safra 2017/2018. Piracicaba, SP (Latitude: $-22,725^{\circ}$). 74
- Tabela 27 - Valores estimados de eficiência de otimização de temperatura (E_T , kg kg^{-1}) em função da produtividade potencial (P_p , kg ha^{-1}), produtividade potencial deplecionada pela temperatura (P_{PT} , kg ha^{-1}), índice de área foliar máximo ($IAFx$, $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$), temperatura do ar (T , $^{\circ}\text{C}$), insolação (n , h d^{-1}), duração do ciclo (DC , d) e índice de colheita (IC , kg kg^{-1}). Sistemas de produção (SP): irrigado (I) e sequeiro (S). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, SP (I) e Fazenda Cabeceira do Taquari, Leme, SP (S). Safras 2016/2017 e 2017/2018. 75
- Tabela 28 - Produtividade potencial deplecionada pela temperatura (P_{PT} , kg ha^{-1}) da cultura de soja em função do fotoperíodo (N , h d^{-1}), insolação (n , h d^{-1}) (igual ao fotoperíodo), temperatura (T , $^{\circ}\text{C}$), índice de área foliar máximo ($IAFx$, $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) (igual ao índice de área foliar máximo ótimo) e duração do ciclo (DC , d). Ambiente de produção 1. Cultivar TMG-7161-RR. Safra 2016/2017. Piracicaba, SP (Latitude: $-22,725^{\circ}$). 76

- Tabela 29 - Produtividade potencial deplecionada pela temperatura (P_{PT} , kg ha^{-1}) da cultura de soja em função do fotoperíodo (N , h d^{-1}), insolação (n , h d^{-1}) (igual ao fotoperíodo), temperatura (T , $^{\circ}\text{C}$), índice de área foliar máximo (IAF_x , $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) (igual ao índice de área foliar máximo ótimo) e duração do ciclo (DC , d). Ambiente de produção 2. Cultivar TMG-7161-RR. Safra 2016/2017. Leme, SP (Latitude: $-22,1892^{\circ}$). 77
- Tabela 30 - Produtividade potencial deplecionada pela temperatura (P_{PT} , kg ha^{-1}) da cultura de soja em função do fotoperíodo (N , h d^{-1}), insolação (n , h d^{-1}) (igual ao fotoperíodo), temperatura (T , $^{\circ}\text{C}$), índice de área foliar máximo (IAF_x , $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) (igual ao índice de área foliar máximo ótimo) e duração do ciclo (DC , d). Ambiente de produção 3. Cultivares BMX-Potência-RR, TMG-1067-RR, BMX-Ícone-RR e BMX-Power-RR. Safra 2016/2017. Piracicaba, SP (Latitude: $-22,725^{\circ}$). 78
- Tabela 31 - Produtividade potencial deplecionada pela temperatura (P_{PT} , kg ha^{-1}) da cultura de soja em função do fotoperíodo (N , h d^{-1}), insolação (n , h d^{-1}) (igual ao fotoperíodo), temperatura (T , $^{\circ}\text{C}$), índice de área foliar máximo (IAF_x , $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) (igual ao índice de área foliar máximo ótimo) e duração do ciclo (DC , d). Ambiente de produção 4. Cultivares BMX-Potência-RR, TMG-1067-RR, BMX-Ícone-RR e BMX-Power-RR. Safra 2016/2017. Leme, SP (Latitude: $-22,1892^{\circ}$). 79
- Tabela 32 - Produtividade potencial deplecionada pela temperatura (P_{PT} , kg ha^{-1}) da cultura de soja em função do fotoperíodo (N , h d^{-1}), insolação (n , h d^{-1}) (igual ao fotoperíodo), temperatura (T , $^{\circ}\text{C}$), índice de área foliar máximo (IAF_x , $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) (igual ao índice de área foliar máximo ótimo) e duração do ciclo (DC , d). Ambiente de produção 5. Cultivar BMX-Ativa-RR. Safra 2017/2018. Piracicaba, SP (Latitude: $-22,725^{\circ}$). 80
- Tabela 33 - Valores estimados de eficiência dos elementos do clima definidores de produtividade potencial (E_{EC} , kg kg^{-1}) em função da eficiência do uso de dióxido de carbono (ECO_2 , kg kg^{-1}), eficiência do uso maximizado de luz (E_L , kg kg^{-1}), eficiência do uso de fotoperíodo (E_F , kg kg^{-1}), eficiência de otimização de temperatura (E_T , kg kg^{-1}), insolação (n , h d^{-1}), duração do ciclo (DC , d) e índice de colheita (IC , kg kg^{-1}). Sistemas de produção (SP): irrigado (I) e sequeiro (S). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, SP (P) e Fazenda Cabeceira do Taquari, Leme, SP (L). Safras 2016/2017 e 2017/2018. 81

Tabela 34 - Valores de eficiência edáfica (E_e) referentes aos experimentos I (sistema de produção: irrigado) e II (sistema de produção: sequeiro). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Safra 2017/2018. Piracicaba, SP.....	82
Tabela 35 - Valores do índice de suficiência hídrica (I_W) referentes aos experimentos I (sistema de produção: irrigado) e II (sistema de produção: sequeiro). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Safra 2017/2018. Piracicaba, SP.....	82
Tabela 36 - Valores dos índices de suficiência de nutrientes minerais (I_N) referentes aos experimentos I (sistema de produção: irrigado) e II (sistema de produção: sequeiro). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Safra 2017/2018. Piracicaba, SP.	83
Tabela 37 - Valores de eficiência de manejo agrícola (E_M) referentes aos experimentos I (sistema de produção: irrigado) e II (sistema de produção: sequeiro). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Safra 2017/2018. Piracicaba, SP.....	83
Tabela 38 - Valores de produtividade obtenível (P_I , kg ha ⁻¹). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Experimento I (sistema de produção: irrigado). Safra 2017/2018. Piracicaba, SP.	84
Tabela 39 - Valores de produtividade real (P_R , kg ha ⁻¹). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Experimento II (sistema de produção: sequeiro). Safra 2017/2018. Piracicaba, SP.....	84
Tabela 40 - Valores de temperatura mínima (T_n , °C) e máxima (T_x , °C). Piracicaba-SP. Posto agrometeorológico. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Safra 2017/2018.	86
Tabela 41 - Valores de chuva (C, mm). Piracicaba-SP. Posto agrometeorológico. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Safra 2017/2018.....	87

Tabela 42 - Valores de índice de área foliar (IAF, $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$). Sistema de produção: irrigado. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Experimento I. Safra 2017/2018. Piracicaba, SP.....	88
Tabela 43 - Valores de índice de área foliar (IAF, $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$). Sistema de produção: sequeiro. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Experimento II. Safra 2017/2018. Piracicaba, SP.	88
Tabela 44 - Valores de massa de matéria seca de parte aérea (MSPA, g planta^{-1}). Sistema de produção: irrigado. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Experimento I. Safra 2017/18. Piracicaba, SP.	89
Tabela 45 - Valores de massa de matéria seca de parte aérea (MSPA, g). Sistema de produção: sequeiro. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Experimento II. Safra 2017/2018. Piracicaba, SP.	90
Tabela 46 - Valores de altura de inserção da primeira vagem (INS, cm). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Experimento I (sistema de produção: irrigado). Safra 2017/2018. Piracicaba, SP.	90
Tabela 47 - Valores de altura de plantas (INS, cm). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Experimento II (sistema de produção: sequeiro). Safra 2017/2018. Piracicaba, SP. ..	91
Tabela 48 - Valores de altura de plantas (H, cm). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Experimento I (sistema de produção: irrigado). Safra 2017/2018. Piracicaba, SP.....	91
Tabela 49 - Valores de altura de plantas (H, cm). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Experimento II (sistema de produção: sequeiro). Safra 2017/2018. Piracicaba, SP. ..	92
Tabela 50 - Valores de número de vagens por planta (NV), número de grãos por planta (NG) e massa de mil grãos (MMG, g). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Experimento I (sistema de produção: irrigado). Safra 2017/2018. Piracicaba, SP.....	92

Tabela 51 - Valores de número de vagens por planta (NV), número de grãos por planta (NG) e massa de mil grãos (MMG, g). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Experimento II (sistema de produção: sequeiro). Safra 2017/2018. Piracicaba, SP....93

1 INTRODUÇÃO

A cultura de soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é muito importante mundialmente em função de seu uso na alimentação animal, como principal fonte de proteína e óleo, além de constituir a matéria-prima básica para diversos setores da indústria. No Brasil, a soja é um dos grãos mais produzidos, esse aumento se deve, principalmente, à alta tecnologia que os produtores vêm adotando em suas áreas de produção, como fertilizantes e insumos cada vez mais eficientes.

Sabe-se que a produtividade potencial de uma cultura é determinada por fatores genéticos e pelos seguintes atributos do ambiente de produção: temperatura, radiação solar, pressão parcial de dióxido de carbono e fotoperíodo, sem restrição de água, nutrientes, plantas daninhas, pragas e doenças (DOORENBOS; KASSAM, 1994). A disponibilidade hídrica afeta o crescimento e desenvolvimento da cultura de soja, especialmente durante o período reprodutivo, fase de elevada atividade fisiológica (FAGAN, 2008).

Muito se tem estudado a respeito da interação das plantas com o ambiente e suas respostas aos diferentes estímulos do mesmo. Principalmente para culturas de grande interesse econômico, busca-se entender essas repostas e definir qual a relação das mesmas com o produto final de interesse, para que se possam desenvolver tecnologias de produção para mitigar os efeitos negativos de um ambiente desfavorável à planta e também para que se promova o melhoramento genético das espécies buscando uma melhor adaptação para esses ambientes desfavoráveis.

O estresse hídrico é responsável por grande parte da redução da produtividade da maioria das espécies cultivadas no mundo. Por esse motivo, é de grande importância a caracterização das respostas das plantas a fatores abióticos, e elucidar os mecanismos fisiológicos e bioquímicos que regulam tais respostas (TAIZ; ZEIGER, 2013).

Variações na época de semeadura, as quais a cultura de soja está sujeita, expõem a cultura a diferentes combinações de fotoperíodo e temperatura. Essas combinações, com reflexos diferenciados entre cultivares (genótipos) através da duração de ciclo, repercutem no desenvolvimento da área foliar e na absorção de radiação solar fotossinteticamente, podendo constituir em fator importante para o manejo da cultura nos diversos sistemas de produção.

O presente trabalho tem por objetivo: (a) propor uma metodologia para avaliar a eficiência climática (E_C), para a cultura de soja, por intermédio da avaliação da: (i) nebulosidade, do (ii) desvio da temperatura do ar ambiente em relação à temperatura ótima e

do (ii) índice de área foliar (IAF) relacionado ao IAF máximo; (b) realizar uma análise crítica do modelo através da comparação com dados observados experimentalmente a campo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A cultura de soja

A soja é originada da China e pertence à família Fabaceae (SEDIYAMA; TEIXEIRA; BARROS, 2009). Participa do desenvolvimento de um amplo complexo agroindustrial, além de ser uma *commodity*, padronizada e uniforme, podendo ser produzida e negociada por produtores de diversos países (HIRAKURI; LAZZAROTO, 2011).

A cultura tem destaque no cenário do agronegócio brasileiro (EMBRAPA, 2017). No Brasil, a soja corresponde à cultura que mais cresceu nos últimos trinta anos, ocupando cerca de 59% da área semeada com grãos no país, o que corresponde, segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento a, aproximadamente, 33,8 milhões de hectares com uma produção total de, aproximadamente, 114 milhões de toneladas do grão na safra de 2016/2017, representando aumentos de 1,9% e 19,4%, respectivamente, em área semeada e produção total de grãos em relação à safra de 2015/2016, sendo uma importante fonte de divisas para o país, contribuindo com parcela significativa nas exportações (CONAB, 2017).

De acordo com levantamentos realizados pela USDA (2013) e Conab (2017), os maiores produtores mundiais de soja são, em ordem decrescente, os Estados Unidos da América, Brasil e Argentina. A cultura de soja é a mais importante oleaginosa cultivada.

Apesar da contínua expansão nos estados do norte e nordeste do país (Figura 1), Farias, Nepomuceno e Neumaier (2007) chamam a atenção para o fato de que o sucesso de todo esse complexo é, ainda hoje, extremamente dependente das condições climáticas. São comuns perdas anuais em produtividade devido à escassez de água durante o ciclo da cultura, principalmente na região Sul do Brasil. Já na região Centro Oeste ocorre o excesso de chuvas durante a colheita (SILVA, 2012).

Com produtividade média brasileira de 3.362 kg ha^{-1} (CONAB, 2017), algumas regiões tradicionais de produção chegam a atingir produtividades na ordem de 5.000 kg ha^{-1} . A água é um dos principais fatores que mais contribuem para a redução da produtividade, podendo causar reduções severas, como o observado pelos seguintes autores: Rambo et al. (2003): redução de 18%, Zhang et al. (2007): redução de 20 a 46% e Assad et al. (2007): perdas de até 70%.

Figura 1 - Comparativo entre as áreas nacionais de produção de soja e de condição hídrica geral (destaque para a parcela da área produtiva sujeita a restrições por falta de chuva: região amarela no mapa inferior) (CONAB, 2017).

2.1.1 Fenologia

A descrição dos estádios fenológicos se encontra na Tabela 1 (FEHR; CAVINESS, 1977). Cabe salientar que a fenologia é uma referência de manejo, motivo pelo qual norteou todas as intervenções durante a condução dos experimentos de campo.

Tabela 1 - Descrição dos estádios fenológicos da cultura de soja (FEHR; CAVINESS, 1977).

Fase vegetativa		
Estádio	Subtítulo	Descrição ¹
V _E	Emergência	Cotilédones acima da superfície do solo
V _C	Estádio cotiledonar	Cotilédones completamente abertos
V ₁	Primeiro nó	Folhas unifoliadas desenvolvidas
V ₂	Segundo nó	Primeira folha trifoliada desenvolvida
V ₃	Terceiro nó	Segunda folha trifoliada desenvolvida
V _n	n-ésimo nó	n-ésima folha trifoliada desenvolvida
Fase reprodutiva		
Estádio	Subtítulo	Descrição ¹
R ₁	Início do florescimento	Uma flor aberta em qualquer nó da haste principal
R ₂	Florescimento pleno	Uma flor aberta num dos dois últimos nós da haste principal com folha desenvolvida
R ₃	Início da frutificação	Vagem com 5 mm de comprimento num dos 4 últimos nós da haste principal com folha desenvolvida
R ₄	Vagem desenvolvida	Vagem com 2 cm de comprimento num dos 4 últimos nós da haste principal com folha desenvolvida
R ₅	Início da formação dos grãos	Grão com 3 mm de diâmetro num dos 4 últimos nós da haste principal com folha desenvolvida
R ₆	Grãos desenvolvidos	Grãos verdes preenchendo toda a cavidade da vagem de um dos 4 últimos nós da haste principal com folha desenvolvida
R ₇	Início da maturação	Uma vagem normal no caule com coloração madura
R ₈	Maturação a campo	95% das vagens com coloração madura

¹ A caracterização do estádio fenológico é definida quando 50% das plantas da parcela ou amostra apresenta as características descritas.

2.1.2 Ecofisiologia

Algumas práticas corriqueiras do cotidiano do agricultor, se estudando a fundo os conceitos de ecofisiologia da cultura de soja, tornam-se elaboradas estratégias de manejo para a manutenção e, até mesmo, aumento de produtividade, tais como data de semeadura, espaçamento entre fileiras, população de plantas e cultivar a se adotar. Faz-se importante o entendimento das relações da cultura com o ambiente devido a relação direta existente entre o sucesso do complexo produtivo de soja e as condições climáticas ocorridas durante o ciclo de desenvolvimento da cultura.

Farias, Neumaier e Nepomuceno (2009) evidenciam a influência das condições climáticas locais e tipo de cultivar adotado no crescimento e desenvolvimento de soja. Os mesmos autores chamam a atenção para o efeito da relação entre nictoperíodo e fotoperíodo para o início da floração da planta, caracterizada como planta de dia curto (floresce sob condições de noites longas).

O ciclo, em dias, de um cultivar de soja é determinado pela relação entre o fotoperíodo ambiental (F_a) e o fotoperíodo crítico característico do genótipo (F_c), além da influência da temperatura atuando como moduladora do processo. Em média o F_c dos cultivares brasileiros se encontra entre 13 e 14 horas, porém, cada genótipo possui seu F_c para o início do florescimento. Como regra geral, o fotoperíodo tem que estar abaixo do crítico para que a indução da floração ocorra. De acordo com Rodrigues et al. (2001), o estímulo ao fotoperíodo é iniciado com a emissão da segunda folha verdadeira, e a partir deste ponto ocorrem estímulos que induzem a diferenciação dos meristemas vegetativos em reprodutivos e a velocidade deste processo é função do grau de sensibilidade termofotoperiódica do cultivar.

Câmara et al. (1997) verificaram, em casa de vegetação, que quando a situação é de fotoperíodo ambiental superior ao considerado crítico ao cultivar, a mesma apresenta maior altura devido à maior duração do subperíodo entre a emergência e o início da floração, tendo, consequentemente, maior acúmulo de fotoassimilados.

Em trabalhos realizados em Dourados (MS) avaliando o efeito do fotoperíodo para a cultura de soja em diferentes épocas de semeadura, Fietz e Rangel (2008) verificaram que quando a semeadura é realizada em outubro o florescimento ainda ocorre em ascensão de fotoperíodo, ou seja, antes do solstício de verão, já que o desenvolvimento vegetativo ocorre com fotoperíodo inferior ao crítico, estimado em 13 horas, que resulta em menor crescimento vegetativo. Para a semeadura de novembro o desenvolvimento vegetativo ocorre em condições de fotoperíodo superior ao crítico, possibilitando assim, o máximo crescimento da

cultura, com o aumento do período entre a emergência e o início de floração, quando comparada à semeadura de outubro.

Por ser naturalmente uma planta de dias curtos (noites longas), biologicamente, a associação entre a cultura de soja e países localizados em latitudes acima dos 30° possuindo clima temperado, é lógica, sendo o Brasil uma exceção neste contexto. Devido a este fato, vários esforços foram realizados com relação ao melhoramento genético da espécie para adaptação às condições tropicais do país, fundamentais para o sucesso deste cultivo em território brasileiro. Farias, Neumaier e Nepomuceno (2009) enfatizam o fato de ser atribuído ao Brasil o título de país que tropicalizou a soja, visto que, em tratando da influência do fotoperíodo no crescimento e desenvolvimento da planta de soja, seria impossível cultivá-la em condições de baixas latitudes com produtividade satisfatória devido ao baixo crescimento no período vegetativo.

Por meio do melhoramento genético, foram selecionados cultivares de soja que apresentaram um período juvenil longo entre a emergência e o início da floração, com isso, diminuiu-se a sensibilidade ao fotoperíodo, e apesar das condições fotoperiódicas serem favoráveis ao florescimento, há a necessidade de acúmulo de graus dias para o término do período juvenil para que posteriormente se inicie o período reprodutivo da cultura.

Farias, Nepomuceno e Neumaier (2007) comentam que a fisiologia do período juvenil longo ainda não estão totalmente elucidadas pela ciência, principalmente de como os genótipos respondem ao fotoperíodo, apresentando duas hipóteses, uma de que pode ser uma fase em que a planta não está apta a florescer ou a planta apresenta uma menor sensibilidade ao fotoperíodo, fazendo com que haja a necessidade de um período fototérmico maior para induzir a floração. Ao contrário da região central do Brasil, para a região sul, os cultivares podem apresentar maior sensibilidade ao fotoperíodo, já que nestes locais a variação do fotoperíodo e a duração da noite ao longo do ano são maiores e atendem as exigências da cultura (HAMAWAKI et al., 2007).

Para se definir a época mais adequada para semeadura de soja, visando evitar, ao máximo, perda de rendimento de grãos geralmente, leva-se em consideração os seguintes fatores: ciclo do cultivar (na região em questão), condições climáticas da região, término do período de vazio sanitário e, a nível da unidade produtora, o sistema produtivo e o operacional da propriedade. De acordo com Bonato et al. (1998), considerando-se a data de semeadura, épocas tardias apresentam como principal razão de perda de rendimento o inadequado

crescimento vegetativo em função do florescimento precoce, e a ineficiência na utilização dos recursos naturais - radiação e temperatura.

Rodrigues et al. (2006) citam que diversos fatores podem influenciar na data de semeadura de soja, forçando-a às épocas menos favoráveis, mais frequentemente influenciam na tomada de decisão do agricultor os diferentes modelos de produção nos quais a cultura de soja está inserida e as adversidades climáticas, principalmente com relação a presença de *deficit* hídrico (veranicos), condicionando o produtor na utilização da época de semeadura como estratégia de escape.

Para a temperatura do ar, além de fator modulador da duração do ciclo para a cultura de soja, está também afeta o crescimento da planta, apresentando algumas restrições em fases específicas do desenvolvimento. Farias, Neumaier e Nepomuceno (2009) destacam que para a semeadura a temperatura do solo não deve ser inferior a 20°C, pois compromete a germinação e a emergência das plântulas. Neumaier et al. (2000) destacam que se a temperatura do solo estiver muito elevada (superior a 55°C), plantas em fase cotiledonar podem sofrer desestruturação das membranas celulares e desidratação, resultando em tombamento.

Outra condição limitante para a cultura de soja é de que regiões com temperatura do ar menor que 10°C ou maior que 40°C são impróprias ao cultivo, pois sob baixa temperatura do ar o crescimento vegetativo é insignificante e sob alta temperatura do ar ocorrem danos à floração, reduzindo a capacidade de retenção de legumes. O baixo desenvolvimento e crescimento da cultura à temperatura do ar menor que 10°C está associada a temperatura basal da cultura que se encontra entre 13°C (FARIAS, NEUMAIER E NEPOMUCENO, 2009) e 14°C (CAMARGO; BRUNINI; MIRANDA, 1987), havendo a necessidade de que a temperatura do ar esteja acima da temperatura basal para que a floração seja induzida.

A condição ótima de temperatura para crescimento e desenvolvimento de soja se encontra entre 20°C e 30°C (EMBRAPA, 2011). A faixa ideal de temperatura do ar para a cultura de soja está associada ao máximo acúmulo de CO₂, obtida pela relação entre a fotossíntese bruta realizada pela planta em certa disponibilidade de energia (radiação solar) e a taxa de manutenção respiratória, função da temperatura do ar, balanço que resulta na fotossíntese líquida e no real acúmulo de CO₂ pela planta (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002). Como a fotossíntese bruta aumenta até certo ponto em função da temperatura do ar e a taxa respiratória aumenta proporcionalmente ao aumento da temperatura do ar, o ponto em que as retas da fotossíntese bruta e da taxa respiratória se cruzam, representam as temperaturas basais inferior e superior. O intervalo entre essas linhas é o total

de fotossíntese líquida, ou seja, o que realmente poderá ser utilizado pela planta em seu crescimento, princípio base para os modelos de estimativa de produtividade.

Como apresentado anteriormente, a temperatura do ar tem efeito sobre a duração do ciclo da cultura de soja, principalmente em cultivares menos sensíveis ao fotoperíodo. Há uma diminuição do período entre a emergência e início da floração sob temperaturas elevadas, o que pode acarretar em redução da estatura da planta, efeito mais pronunciado quando as maiores temperaturas ocorrem sob condição de *deficit* hídrico e insuficiência fotoperiódica durante a fase de crescimento, resultando em diferentes ciclos em mesma época de semeadura (FARIAS, NEUMAIER; NEPOMUCENO, 2009). Para a diferença da duração do ciclo entre cultivares em mesma época de semeadura, os autores atribuem a resposta diferenciada de cada cultivar ao fotoperíodo e à temperatura do ar.

Rodrigues et al. (2001) afirmam que o estudo do tempo para o início da floração de soja, sob diferentes condições de fotoperíodo e temperatura do ar, são de suma importância para o manejo da cultura e o uso de modelos de crescimento e desenvolvimento. Em função da latitude e dos cultivares utilizados, a duração do ciclo pode variar e para um melhor entendimento entre pesquisadores e produtores rurais utiliza-se a classificação de ciclo em precoce, semiprecoce, médio, semitardio e tardio, como apresentado na Tabela 2, em função do local de cultivo e da duração do ciclo total da cultura em dias.

Tabela 2 - Duração do ciclo da cultura de soja, em dias, pela classificação precoce, semiprecoce, médio, semitardio e tardio para diferentes estados do Brasil.

Ciclo	Estado		
	Paraná	Minas Gerais	Maranhão
Precoce	Até 115 dias	Até 100 dias	Até 110 dias
Semiprecoce	116 a 125 dias	101 a 110 dias	-
Médio	126 a 137 dias	111 a 125 dias	111 a 125 dias
Semitardio	138 a 150 dias	126 a 145 dias	-
Tardio	Mais de 150 dias	Mais de 145 dias	Mais de 125 dias

Fonte: EMBRAPA (2011).

Atualmente, uma nova classificação vem sendo adotada para definir a duração total do ciclo dos cultivares de soja no Brasil, denominando-as em função do grupo de maturação. Essa classificação é utilizada nos Estados Unidos e engloba a interação dos fatores fotoperíodo, temperatura do ar e a adaptação do cultivar ao local de cultivo (ALLIPRANDINI et al., 2009). Os cultivares estão divididos em 13 grupos, iniciando com o grupo 000, tido como o mais precoce e englobando cultivares adaptados às condições de dias longos, comuns nas áreas de cultivo do sul do Canadá e norte dos Estados Unidos. O grupo de maturidade 10, último dessa classificação, inclui cultivares tardios adaptados aos dias curtos e utilizados em regiões de cultivos tropicais, como o norte do Brasil, próximo à linha do Equador. Como pode ser observado na Figura 2, nas regiões produtoras de soja no Brasil são utilizados cultivares que variam dos grupos de maturação 5 a 9.

Figura 2 - Grupos de maturação dos cultivares de soja utilizados no Brasil em função da latitude de cultivo e a distribuição das áreas produtoras de soja no Brasil em 1970, 1980 e 2003. Fonte: Embrapa (2011).

A vantagem do uso dos grupos de maturação de soja é a relatividade da duração do ciclo. Um cultivar do grupo 7 apresenta um ciclo maior que um cultivar do grupo 6.5 em um mesmo local de cultivo, sendo atribuído para cada ponto de diferença entre grupos em torno de 1,5 a 2,0 dias na duração total do ciclo, que para o exemplo resultaria em uma diferença de 7 a 10 dias a mais no ciclo total do cultivar do grupo 7. Com base na região de cultivo e nos grupos de maturação utilizados no Brasil, Kaster e Farias (2011) apresentam a duração total do ciclo em dias, definição a qual é apresentada na Tabela 3. Observe que um cultivar

classificado como grupo de maturação 7.5 apresenta um ciclo maior que 146 dias na região sul, enquanto que este mesmo grupo apresenta duração total de ciclo de 120 dias quando cultivado no Sudeste. Dessa forma, a classificação dos cultivares em função do grupo de maturação auxilia no planejamento do cultivo no que diz respeito à escolha de cultivar mais adaptado para a região e a duração do ciclo.

Tabela 3 - Duração total do ciclo, em dias, em função do grupo de maturação e macrorregião de cultivo de soja, associada aos grupos de ciclo utilizados no zoneamento agrícola.

Macrorregião	Ciclo Curto		Ciclo Médio		Ciclo Longo	
	GM ¹	DM ²	GM	DM	GM	DM
Sul	≤6,3	≤130	6,4 a 7,4	131 a 145	≥7,5	≥146
Centro-Sul	≤6,7	≤125	6,8 a 7,6	126 a 135	≥7,7	≥136
Sudeste	≤7,5	≤120	7,6 a 8,2	121 a 130	≥8,3	≥131
Centro-Oeste	≤7,8	≤115	7,9 a 8,5	116 a 125	≥8,6	≥126
Norte/Nordeste	≤8,6	≤112	8,7 a 9,3	113 a 125	≥9,4	≥126

¹Grupo de Maturação Relativa (ALLIPRANDINI et al., 2009). ²Número de dias para a maturação.

2.1.3 Data de semeadura e produtividade

Como citado anteriormente à importância em âmbito nacional, da cultura de soja, é inquestionável. Em se tratando de ambiente, muitos são os fatores que impactam e podem penalizar a produtividade de grãos, porém o principal fator restritivo para a produtividade de uma cultura, em sistema de sequeiro, é a deficiência hídrica. De acordo com Berlato e Fontana (2003), a precipitação pluvial durante a safra de soja determina grande parte da variabilidade interanual da produção, estima-se que, para a soja, 93% das perdas na safra ocorram devido a este fator.

Sendo a precipitação pluvial a principal variável meteorológica a afetar a produtividade das culturas agrícolas de sequeiro, podem-se empregar índices agroclimáticos para auxiliar na escolha de datas preferenciais de semeadura. Dentre esses índices, o de Satisfação das Necessidades de Água (ISNA), que expressa a relação entre as evapotranspirações real e a máxima da cultura, durante as fases críticas das culturas, vem sendo utilizado na elaboração do zoneamento de risco climático, o qual delimita áreas e

períodos de semeadura favoráveis ao cultivo de culturas agrícolas no Brasil, desenvolvido pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2012).

Como alternativa a metodologia empregada pelo MAPA, tem-se o índice de eficiência climática (EC), utilizado por Bonnetarrère et al. (2007), para a cultura de milho, para identificação de datas preferenciais de semeadura no RS. Tal índice (EC) é obtido pela relação entre as produtividades atingível (PA) e potencial (PPf), demonstra, em termos quantitativos, a redução produtiva ocasionada pelo *deficit* hídrico.

Segundo Pereira, Angelocci e Sentelhas (2002), a produtividade atingível (PA) é aquela obtida a partir da penalização da produtividade potencial (PPf) pelo *deficit* hídrico que ocorre em cada fase de desenvolvimento da cultura. A PPf é aquela obtida em função das características da cultura e as variáveis do ambiente, como radiação solar, temperatura e fotoperíodo. Ambas as produtividades (PA e PPf) são estimadas através de modelagem.

Battisti et al. (2012, 2013), estudando o efeito de diferentes datas de semeadura para as culturas de soja e do trigo, em diversas localidades do RS, observaram que época de semeadura influência no resultado de forma igual para todas as localidades, apesar de ocorrerem diferenças significativas entre localidades para produtividade potencial da cultura (PPf), produtividade atingível (PA) e eficiência climática (EC).

No mesmo trabalho, os autores mostram relação entre valores de PPf e a data de semeadura de soja, sendo que dentro de um intervalo de entre 01/10 e 21/12, a data com maior valor potencial ocorre no dia 16/10, a partir desta data ocorre redução gradativa até o período final da janela de semeadura. Neste estudo a PPf variou entre 6.887 e 6.080 kg ha⁻¹, respectivamente, nas cidades de São Borja - RS (estatisticamente superior as demais localidades) e Encruzilhada do Sul (RS) (não diferindo estatisticamente de Veranópolis - RS). Ventimiglia et al. (1999), avaliando a PPf de soja em condições irrigadas em Eldorado do Sul - RS, obtiveram PPf de 10.000 kg ha⁻¹, entretanto estes autores fizeram a estimativa através da contagem de legumes presentes na planta em R₅.

Levantamentos realizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (IBGE, 2010), no Rio Grande do Sul entre os anos 1990 a 2008, apresentam produtividades médias variando entre 666 a 2.400 kg ha⁻¹ (produtividade observada - PO), tais médias, quando comparadas as produtividades atingíveis estimadas por Battisti et al. (2013), variando entre 1.977 kg ha⁻¹ e 3.776 kg ha⁻¹. Deve-se ressaltar que a PA considera apenas perdas por *deficit* hídrico. Desse modo, valores de PA tendem a serem maiores do que os da PO, já que outros fatores associados ao manejo da cultura não são considerados pelo modelo de simulação utilizado.

Bergamaschi et al. (2007) comentaram que a distribuição irregular das chuvas durante o ciclo da cultura de soja pode explicar uma série de atributos de rendimento sob as condições de cultivo de sequeiro. Tal fato deve ser observado ao se escolher as datas preferenciais de semeadura, optando-se sempre que possível por aquelas de maior eficiência climática (Ec).

Uma vez caracterizado o potencial climático de um determinado local, para o cultivo de uma cultura, quantificar a perda de produtividade devido ao *deficit* hídrico, o próximo passo se trata em determinar as causas que levam a produtividade observada ser inferior, na maioria dos casos, à atingível, em outras palavras, quantificar as perdas de produtividade ocasionadas em consequência à ineficiência técnica do agricultor, para tal, têm-se o índice de eficiência agrícola (EA), que é conceituado, por Marin et al. (2008), como sendo um indicador do nível de desenvolvimento agrícola regional, sendo a relação entre a energia efetivamente utilizada e a que foi fornecida pelo sistema.

Os mesmos autores adotaram esse conceito, considerando como EA a razão entre a produtividade observada a campo e a atingível (PA), estimada por modelos de simulação de crescimento de plantas.

A produtividade real (PR) - ou produtividade observada (PO) - por outro lado, é aquela ocorrida a campo, normalmente menor que a PA, por considerar, além dos efeitos das condições meteorológicas, os efeitos do nível de manejo da cultura, o que contempla a correção química e fertilização do solo, as práticas de conservação do solo, o controle de pragas, doenças e plantas daninhas, entre outras.

2.1.4 Produtividade atingível

Para estimar a produtividade atingível (P_A , kg ha⁻¹), foi considerada a penalização da produtividade potencial (P_P , kg ha⁻¹) pela deficiência hídrica, sendo que, para a primeira fase de desenvolvimento da cultura, o valor de P_P corresponde ao total acumulado durante o ciclo da cultura de soja. Para a fase seguinte, esse valor corresponde à P_A obtida ao final da fase anterior, assim como para as fases subsequentes, utilizando a seguinte equação:

$$P_A = P_P \cdot \prod_{i=1}^m \left(1 - Ky_i \cdot \frac{ETr_i}{ETc_i} \right) \quad (1)$$

em que Ky_i se refere ao coeficiente de sensibilidade à deficiência hídrica para o i -ésimo período de desenvolvimento da cultura, nas fases vegetativa, reprodutiva e de maturação. Os

valores de Ky_i adotados para essas três fases foram, respectivamente, 0,2, 0,8 e 1,0 para a cultura de soja (DOORENBOS; KASSAM, 1994).

A evapotranspiração potencial da cultura (ETc_i , mm período⁻¹) foi obtida pelo produto entre a evapotranspiração de referência (ETo_i , mm período⁻¹), estimada pelo método proposto por Camargo (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002) utilizando o coeficiente de cultura (Kc_i) para cada fase da cultura de soja.

$$ETc_i = Kc_i \cdot ETo_i \quad (2)$$

Foram adotados os seguintes valores de coeficiente de cultura: 0,50 (Kc_V - entre t_0 e t_1), 1,15 (Kc_R - entre t_2 e t_3) e 0,50 (Kc_M - entre t_4 e t_5) para a cultura de soja (BERLATO, 1987), respectivamente, predominantemente para as fases vegetativa (t_0 a $\frac{t_1+t_2}{2}$), reprodutiva ($\frac{t_1+t_2}{2}$ a $\frac{t_3+t_4}{2}$) e de maturação ($\frac{t_3+t_4}{2}$ a t_5).

Se $t_0 \leq t < t_1$:

$$Kc_i = Kc_V \quad (3)$$

Se $t_1 \leq t < t_2$:

$$Kc_i = Kc_V + \frac{(Kc_R - Kc_V)}{(t_2 - t_1)} \cdot (t_i - t_1) \quad (4)$$

Se $t_2 \leq t < t_3$:

$$Kc_i = Kc_R \quad (5)$$

Se $t_3 \leq t < t_4$:

$$Kc_i = Kc_R + \frac{(Kc_M - Kc_R)}{(t_4 - t_3)} \cdot (t_i - t_3) \quad (6)$$

Se $t_4 \leq t < t_5$:

$$Kc_i = Kc_M \quad (7)$$

Foi realizado o balanço hídrico utilizando o procedimento proposto por Thornthwaite e Mather (1955) para determinação da evapotranspiração real (ETr_i , mm período⁻¹), adotando-se uma capacidade de água disponível no solo de 50 mm (CUNHA et al., 2001).

2.2 Balanço hídrico

O balanço hídrico foi realizado com a finalidade de se conhecer deficiência e/ou excedente hídricos durante o ciclo da cultura de soja, constituindo-se uma ferramenta muito

útil para a recomendação ou não do seu cultivo em determinada região, bem como para definir época de semeadura.

Será adotado o modelo proposto por Dourado-Neto et al. (1991), que permite elaborar o balanço hídrico com variação do coeficiente de evapotranspiração da cultura (K_c) e de profundidade efetiva do sistema radicular (Z_e , cm) para qualquer distribuição de dados climatológicos disponíveis, utilizando o método de Thornthwaite e Mather (1955), com algumas modificações.

2.3 Evapotranspiração potencial de referência

Evapotranspiração de referência (ET_{0i}) é definida como sendo “a perda total de água, na forma de vapor normal de uma superfície natural bem suprida de água à atmosfera, ocorrendo quando a folhagem vegetal se mantém turgescente e quando o processo decorre dependente de atributos do clima, não havendo restrição de água ou cobertura vegetal” para o cálculo de mesma, foi utilizada a seguinte equação (THORNTHWAITE; MATHER, 1955):

$$ET_{0i} = 0,53 \cdot \left(10 \cdot \frac{T_i}{I} \right)^a \cdot \left(\frac{H_i}{12} \right) \cdot N_i \quad (8)$$

em que ET_{0i} se refere à evapotranspiração de referência (mm período^{-1}) ocorrida no i -ésimo período, T_i à temperatura média ($^{\circ}\text{C}$), I ao índice térmico, a ao coeficiente empírico composto, N_i ao número de dias e H_i é o número possível de horas de brilho solar no dia mediano do i -ésimo período do ciclo da cultura de soja.

2.4 Horas de brilho solar

O número médio diário de horas de brilho solar (H) é calculado segundo a fórmula:

$$H_i = \frac{24}{\pi} \arccos[-\text{tg}(\alpha) \text{tg}(\phi_i)] \quad (9)$$

em que α se refere à declinação solar (radianos) no dia mediano do ciclo, e ϕ à latitude (radianos) do local.

2.5 Evapotranspiração potencial da cultura

A evapotranspiração potencial da cultura (ET_{c_i} , mm d⁻¹) representa a maior troca de gases possíveis entre a cultura e a atmosfera, e corresponde ao máximo rendimento da cultura. Estima-se a evapotranspiração máxima da cultura multiplicando-se a evapotranspiração de referência (ET_{o_i} , mm d⁻¹) pelo coeficiente de evapotranspiração da cultura (K_{c_i}) no i-ésimo período, ou seja:

$$ET_{c_i} = ET_{o_i} \cdot K_{c_i} \quad (10)$$

em que K_{c_i} é obtido na literatura através de valores tabelados em função do estágio fenológico da cultura.

2.6 Capacidade de água disponível

Capacidade de água disponível (CAD , mm) se refere ao armazenamento máximo de água disponível para a cultura de soja, podendo ser calculada pela seguinte expressão:

$$CAD_i = 10 \cdot (\theta_{cc} - \theta_{pmp}) \cdot Ze_i \quad (11)$$

em que Ze_i é a profundidade efetiva do sistema radicular (cm) no i-ésimo período, θ_{cc} é a capacidade de campo (cm³ cm⁻³) e θ_{pmp} é o ponto de murcha permanente (cm³ cm⁻³).

2.7 Água disponível

Água disponível (AD_i , mm) é a quantidade de água armazenada no perfil do solo, da superfície à profundidade efetiva do sistema radicular, correspondente ao teor de água entre o ponto de murcha permanente e o teor de água atual:

$$AD_i = 10 \cdot (\theta_{ai} - \theta_{pmp}) \cdot Ze_i \quad (12)$$

em que AD_i se refere à quantidade de água disponível e θ_i à umidade atual média no perfil do solo no i-ésimo período.

2.8 Evapotranspiração real

Para o cálculo da evapotranspiração real (ET_{r_i}), tem-se que:

$$ET_{r_i} = ET_{c_i} \text{ (se } C_i \geq ET_{c_i}) \quad (13)$$

$$ET_{r_i} = C_i + \left| Va_i \right| \text{ (se } C_i < ET_{c_i}) \quad (14)$$

em que C_i se refere à chuva, e Va_i à variação de armazenamento ocorridas no i -ésimo período, sendo $Va_i = Arm_i - Arm_{i-1}$.

2.9 Deficiência hídrica

Deficiência hídrica (DH_i) é definida como a diferença entre a ETr_i e a ETc_i . Existe então deficiência hídrica nos períodos em que a ETr_i é menor que a ETc_i , em consequência da soma da chuva e da variação de água armazenada no perfil de solo ocorridos não suprirem a demanda evapotranspiratória.

2.10 Caracterização do ambiente de produção

De acordo com Prado (2005), o ambiente de produção de cana-de-açúcar é definido em função das condições físicas, hídricas, morfológicas, químicas e mineralógicas dos solos sob manejo adequado da camada arável em relação ao preparo, calagem, adubação, adição de vinhaça, torta de filtro, palha no plantio direto, do controle de ervas daninhas e pragas, mas sempre associadas às propriedades da subsuperfície dos solos e, principalmente, ao clima regional (precipitação pluviométrica, temperatura, radiação solar, evaporação).

Landell et al. (2004) descreveram os ambientes de produção (A_1 , A_2 , B_1 , B_2 , C_1 , C_2 , D_1 , D_2 , E_1 e E_2) de cana-de-açúcar na região centro sul do Brasil com base na produtividade de colmos, em que o ambiente A_1 apresenta produtividades superiores a 100 t ha^{-1} , o ambiente A_2 apresenta produtividades entre 96 e 100 t ha^{-1} , e assim sucessivamente (amplitude de 4 t ha^{-1} para cada classe de produtividade) até o ambiente E_2 que apresenta produtividades inferiores a 68 t ha^{-1} . Nessa classificação são apresentados alguns atributos (profundidade do solo; capacidade de água disponível baixa, média e alta; e caráter álico, eutrófico e distrófico dos solos) e as classes de solos (EMBRAPA, 1999; PRADO, 1999).

Portanto, ambiente de produção é a soma das interações dos atributos de superfície e principalmente de subsuperfície, considerando-se, ainda, o grau de declividade onde os solos ocorrem na paisagem, associadas com as condições climáticas. Os componentes do ambiente de produção são representados pela profundidade, a qual tem direta relação com a disponibilidade de água e com o volume de solo explorado pelas raízes; pela fertilidade, como fonte de nutrientes para as plantas; pela textura, relacionada com os níveis de matéria

orgânica, capacidade de troca de cátions e disponibilidade hídrica; e pela água, como parte da solução do solo, que é vital para a sobrevivência das plantas.

Segundo Joaquim, Bellinaso e Donzelli (1994), ao submeter esse ambiente a um dado manejo, sua capacidade produtiva pode ser momentaneamente ou permanentemente alterada para mais ou menos, dependendo da intensidade com que esses processos foram aplicados. O manejo pode ser aplicado a qualquer um dos três componentes do ambiente (solo, clima e plantas), porém o de resposta mais imediata é o solo (PRADO; LANDELL; ROSSETO, 2002).

Os critérios dos ambientes de produção de cana-de-açúcar incluem os aspectos físico-hídricos, químicos e morfológicos dos solos (PRADO et al., 2003; PRADO, 2004, 2005).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Produtividade de soja

3.1.1 Produtividade potencial de soja

Para estimar a produtividade potencial (P_p) de grãos úmidos, empregou-se o método da Zona Agroecológica descrito por Doorenbos e Kassam (1994), segundo a seguinte equação:

$$P_p = \frac{C_{IAF} \cdot IC \cdot \sum_{i=1}^m P_{PBp_i} \cdot C_{R_i} \cdot \Delta t_i}{1 - u} \quad (15)$$

em que P_{PBp_i} se refere à produtividade potencial bruta padrão de matéria seca ($\text{kg ha}^{-1} \text{d}^{-1}$) no dia mediano do i -ésimo período (decêndio) de uma cultura padrão de soja, C_{IAF} à correção para o índice de área foliar, C_{R_i} à correção para a taxa de respiração (kg kg^{-1}), IC ao índice de colheita (kg kg^{-1}), Δt_i à duração (d) do i -ésimo período, u ao teor de água (kg kg^{-1}) no grão de soja e m ao número de períodos (decêndios) durante o ciclo da cultura de soja.

A P_{PBp_i} foi estimada para cada período i (decêndio) e acumulada ao longo do ciclo. A P_{PBp_i} foi obtida pela soma das produtividades potenciais para período de céu limpo (P_{PBc_i}) e de céu nublado (P_{PBn_i}), as quais foram obtidas pelas seguintes equações:

$$P_{PBc_i} = (107,2 + 8,604 \cdot Qo_i) \cdot cTc_i \cdot \frac{n_i}{N_i} \quad (16)$$

$$cTc_i = -0,0425 + 0,035 \cdot T_i + 0,00325 \cdot T_i^2 - 0,0000925 \cdot T_i^3 \quad (17)$$

$$P_{PBn_i} = (31,7 + 5,234 \cdot Qo_i) \cdot cTn_i \cdot \left(1 - \frac{n_i}{N_i}\right) \quad (18)$$

$$cTn_i = 0,583 + 0,014 \cdot T_i + 0,0013 \cdot T_i^2 - 0,000037 \cdot T_i^3 \quad (19)$$

$$P_{PBp_i} = P_{PBc_i} + P_{PBn_i} \quad (20)$$

em que Qo_i se refere à radiação solar global extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), cTc_i e cTn_i aos fatores de correção para temperatura do ar para dia de céu claro e nublado, respectivamente (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002), n_i à insolação diária (h d^{-1}) e N_i ao número

máximo de horas de brilho solar diário (fotoperíodo) (h d^{-1}) no dia mediano do i -ésimo período (decêndio) do ciclo da cultura de soja.

Para a correção para a taxa de respiração (C_{R_i}), adotou-se o valor de 0,6 para os decêndios em que a temperatura média do ar foi inferior que 20°C e de 0,5 para os decêndios em que a temperatura média do ar foi superior ou igual a 20°C .

Se $T_m < 20^\circ\text{C}$:

$$C_{R_i} = 0,60 \quad (21)$$

Se $T_m \geq 20^\circ\text{C}$:

$$C_{R_i} = 0,50 \quad (22)$$

Adotou-se o índice de colheita (IC) de $0,35 \text{ kg kg}^{-1}$ e teor de água no grão (u) igual a $0,13 \text{ kg kg}^{-1}$ (DOORENBOS; KASSAM, 1994). O número de dias do ciclo (DC - duração do ciclo) foi de 140 dias (CUNHA et al., 2001) para a soja.

Para a correção para o índice de área foliar (C_{IAF}), adotou-se como índice de área foliar máximo ($IAFx$, $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) para a cultura de soja o valor de $4,5 \text{ m}^2 \text{m}^{-2}$ (RODRIGUES et al., 2006), obtendo o C_{IAF} pela seguinte equação:

$$C_{IAF} = 0,0093 + 0,185.IAFx - 0,0175.IAFx^2 \quad (23)$$

3.1.2 Produtividade obtenível

A produtividade obtenível (P_I , kg ha^{-1}) se refere à produtividade determinada experimentalmente em sistema de produção sob irrigação. Neste caso, há depleção de produtividade devido a plantas daninhas, pragas, ácaros, doenças, nematoides, recursos financeiros e manejo, principalmente.

3.1.3 Eficiência climática

Para o cálculo da eficiência de climática (E_C), tem-se que:

$$E_C = \frac{P_I}{P_P} \quad (24)$$

em que P_P se refere à produtividade potencial (kg ha^{-1}) e P_I à produtividade (kg ha^{-1}) obtenível.

3.1.4 Eficiência edafoclimática

Para o cálculo da eficiência edafoclimática (E_E), tem-se que:

$$E_E = \frac{P_R}{P_P} \quad (25)$$

em que P_P se refere à produtividade potencial (kg ha^{-1}) e P_R à produtividade (kg ha^{-1}) real.

3.1.5 Eficiência agrícola

Para o cálculo da eficiência agrícola (E_A), tem-se que:

$$E_A = \frac{P_R}{P_I} \quad (26)$$

em que P_R se refere à produtividade real (kg ha^{-1}) e P_I à produtividade (kg ha^{-1}) obtível.

3.1.6 Eficiência do uso de fotoperíodo

Para o cálculo da eficiência do uso de fotoperíodo (E_F), tem-se que:

$$E_F = \frac{P_{Pn}}{P_P} \quad (27)$$

em que P_P se refere à produtividade potencial utilizando a insolação igual ao fotoperíodo e P_{Pn} à produtividade potencial utilizando a insolação ($n, \text{h d}^{-1}$) observada experimentalmente.

3.1.7 Eficiência de otimização de temperatura

Para o cálculo da temperatura média (T_i), tem-se que:

$$T_i = \frac{Tn_i + Tx_i}{2} \quad (28)$$

em que Tn_i e Tx_i se referem, respectivamente, à temperatura ($^{\circ}\text{C}$) mínima e máxima correspondente ao i -ésimo dia após a emergência.

Para o cálculo da eficiência de otimização de temperatura (E_T), tem-se que:

$$E_T = \frac{P_{PT}}{P_P} \quad (29)$$

em que P_P se refere à produtividade potencial utilizando a temperatura do ar igual à temperatura ótima da cultura e P_{PT} à produtividade potencial utilizando a temperatura média ($T, ^{\circ}\text{C}$) observada experimentalmente.

Para o cálculo da eficiência de otimização de temperatura (E_T), tem-se que:

$$T_i = \frac{Tn_i + Tx_i}{2} \quad (30)$$

em que Tn_i e Tx_i se referem, respectivamente, à temperatura ($^{\circ}\text{C}$) mínima e máxima correspondente ao i -ésimo dia após a emergência.

Se $T_i \leq T_1$:

$$X_i = 0 \quad (31)$$

Se $T_1 < T_i \leq T_2$:

$$X_i = \frac{T_i - T_1}{T_2 - T_1} \quad (32)$$

Se $T_2 < T_i \leq T_3$:

$$X_i = 1 \quad (33)$$

Se $T_3 < T_i \leq T_4$:

$$X_i = \frac{T_i - T_4}{T_3 - T_4} \quad (34)$$

Se $T_i > T_4$:

$$X_i = 0 \quad (35)$$

$$E_T = \frac{\sum_{i=1}^{DC} X_i}{DC} \quad (36)$$

em que X_i se refere à variável auxiliar, T_i temperatura média diária do ar ($^{\circ}\text{C}$), T_1 à temperatura (10°C) basal inferior abaixo da qual a planta não cresce (fotossíntese líquida negativa), T_2 à temperatura (25°C) ótima inferior, T_3 à temperatura (30°C) ótima superior e T_4 à temperatura (40°C) basal superior acima da qual a planta não cresce (fotossíntese líquida negativa) (PENNING DE VRIES et al., 1989).

3.1.8 Eficiência dos elementos do clima definidores de produtividade potencial

Para o cálculo da eficiência dos elementos do clima definidores de produtividade potencial (E_{EC}), foram utilizados os diferentes indicadores estimados pelos seguintes índices: (i) eficiência do uso de dióxido de carbono (CO_2) (neste trabalho: $E_{\text{CO}_2} = 1$), (ii) eficiência do uso de fotoperíodo (duração teórica do dia) (E_F), (iii) eficiência do uso maximizado de luz (maximização de radiação solar fotossinteticamente ativa absorvida) (neste trabalho: $E_L = 1$), e (iv) eficiência de otimização de temperatura (E_T).

$$E_{EC} = \sqrt[4]{E_{CO_2} \cdot E_F \cdot E_L \cdot E_T} \quad (37)$$

3.2 Experimentos de campo

3.2.1 Experimentos realizados

Os experimentos de campo foram conduzidos na área experimental do Departamento de Produção Vegetal da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo (Esalq/USP), no município de Piracicaba, SP. A área está localizada a uma altitude de 546 metros, nas coordenadas geográficas 22°42’ de latitude e 47°30’ de longitude (Tabela 4).

Tabela 4 - Caracterização dos experimentos realizados no Departamento de Produção Vegetal da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq) da Universidade de São Paulo (USP), em Piracicaba, SP: data de semeadura, descrição e número de cultivares. Safra 2017/2018.

Experimento	Data de semeadura	Descrição	Número de cultivares
1	1 de dezembro de 2017	Área irrigada (pivô central)	4
2	1 de dezembro de 2017	Área de sequeiro	4

3.2.2 Clima

As condições edafoclimáticas de Piracicaba são classificadas como Cwa, segundo a classificação de Köppen, com verão chuvoso e período de inverno seco. A temperatura média anual está em torno de 23,86°C, tendo as temperaturas máximas e mínimas médias de 34,9°C e 11,6°C, respectivamente. A precipitação pluvial média anual é da ordem de 776 mm (LEB, 2017).

3.2.3 Solo

O experimento I foi conduzido em solo classificado como Latossolo Vermelho Eutrófico, profundo, de textura muito argilosa e boa drenagem (HEIFFIG et al., 2006).

O experimento II foi conduzido em solo classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico, profundo, de textura média e boa drenagem (HEIFFIG et al., 2006).

A seguir, nas Tabelas 5 e 6, observam-se, respectivamente, os atributos químicos e físicos de ambos os solos.

Com base na interpretação dos resultados das análises de solo, realizou-se a adubação nas doses de 180 e 360 kg ha⁻¹ do fertilizante formulado 8-28-16 + B + Zn nas áreas do pivô (experimento I) e aeroporto (experimento II), respectivamente, segundo recomendações de van Raij et al. (1996).

Tabela 5 - Resultados da análise química: pH (CaCl₂), teor de matéria orgânica (M.O., g dm⁻³), teor de macronutrientes (P, mg dm⁻³) (K, Ca, Mg, H+Al, Al, mmol_c dm⁻³), soma de bases (S, mmol_c dm⁻³), capacidade de trocas catiônica (CTC, mmol_c dm⁻³), saturação por bases (V, %), saturação por alumínio (m, %), e teor enxofre (SO₄, mg dm⁻³). Departamento de Produção Vegetal da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq) da Universidade de São Paulo (USP), em Piracicaba, SP. Safra 2017/2018.

Análise	pH	M.O.	P*	K	Ca	Mg	H+Al	Al	S	CTC	V	m	SO ₄
P1 ¹	6,2	14	32	4,2	38	22	22	0	64	86	74	0	7
P2 ²	5,9	10	11	2,8	34	17	22	0	54	76	71	0	25
A1 ³	5,0	5	11	1,3	6	6	31	1	13	44	30	7	6
A2 ⁴	4,9	5	5	1,3	4	5	31	1	10	41	25	9	7

¹ P1: Pivô (0-20cm); ² P2: Pivô (20-40cm); ³ A1: Aeroporto (0-20cm); ⁴ A2: Aeroporto (20-40cm).

* P: Resina

Tabela 6 - Resultados da análise química de micronutrientes (Cu, Fe, Zn, Mn e B, mg dm⁻³), e física (argila, silte, areia total, areia grossa e areia fina, g kg⁻¹). Departamento de Produção Vegetal da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq) da Universidade de São Paulo (USP), em Piracicaba, SP. Safra 2017/2018.

Análise	Cu	Fe	Zn	Mn	B	Argila	Silte	Areia Total	Areia Grossa	Areia Fina
P1 ¹	3,2	13	2,9	16,0	0,25	519	141	340	110	230
A1 ²	0,6	28	2,0	11,7	0,21	196	14	790	280	510

¹ P1: Pivô (0-20cm); ² A1: Aeroporto (0-20cm).

* Cu, Fe, Zn e Mn: DTPA. B: água quente. Argila (<0,002mm). Silte (0,053-0,002 mm). Areia total (2,00-0,053 mm). Areia grossa (2,00-0,210 mm). Areia fina (0,210-0,053 mm). Textura: P1= Argiloso e A1= Média. (VAN RAIJ, 1991).

3.2.4 Cultivares

Nos experimentos de campo (experimentos 1 - irrigado - e 2 - sequeiro) foram utilizados quatro cultivares, safra 2017/2018, em Piracicaba-SP, para determinação dos indicadores de performance do modelo: (i) BMX-Ativa-RR: ciclo precoce com hábito de crescimento determinado, (ii) BMX-Lança-RR: ciclo precoce com hábito de crescimento indeterminado, (iii) BRS-GO-7460-RR: ciclo médio com hábito de crescimento determinado e (iv) BMX-Desafio-RR: ciclo médio com hábito de crescimento indeterminado.

3.2.5 Delineamento experimental

Os experimentos de soja foram delineados em blocos ao acaso, contendo cinco repetições, sendo as parcelas compostas por sete fileiras com 5 m de comprimento, espaçadas entre si 0,45 m.

Inicialmente foram utilizadas altas densidades de semeadura para todas os cultivares. Posteriormente, quando os mesmos se encontravam no estágio fenológico V_1/V_2 (ou seja, plantas consideradas totalmente estabelecidas), realizou-se o desbaste para as populações consideradas ótimas para cada cultivar, a saber: (i) BMX-Ativa-RR: 355.555 plantas ha^{-1} ; (ii) BMX-Lança-RR: 288.888 plantas ha^{-1} ; (iii) BRS-GO-7460-RR: 266.666 plantas ha^{-1} ; e (iv) BMX-Desafio-RR: 222.222 plantas ha^{-1} .

Os manejos fitossanitários de plantas daninhas, doenças e insetos (pragas) foram realizados visando o controle total de tais fatores, a fim de minimizar a interferência dos mesmos sobre as plantas de soja.

As sementes foram inoculadas com *Bradyrhizobium japonicum*, via inoculante líquido (concentração de $5,0 \times 10^9$ células viáveis por mL) e tratadas com piraclostrobina + fipronil + tiofanato-metílico, na dose recomendada (vide bula do produto comercial).

3.2.6 Eficiência de performance agrícola

A eficiência de performance agrícola (E_{PA}) (Tabela 7) foi avaliada por intermédio da eficiência dos elementos do clima (E_{EC}), eficiência edáfica (E_E) e eficiência de manejo (E_M) nos sistemas de produção da cultura de soja irrigado e sequeiro na safra de verão (safra 2017/2018).

$$E_{PA} = \sqrt[3]{E_{EC} \cdot E_E \cdot E_M} \quad (38)$$

Tabela 7 -Valores de eficiência de performance agrícola (E_{PA}) e respectivas classes sugeridas para classificação. Departamento de Produção Vegetal da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq) da Universidade de São Paulo (USP), em Piracicaba, SP. Safra 2017/2018.

E_{PA}	Classe	E_{PA}	Classe
0,90-1,00	I	0,40-0,50	VI
0,80-0,90	II	0,30-0,40	VII
0,70-0,80	III	0,20-0,30	VIII
0,60-0,70	IV	0,10-0,20	IX
0,50-0,60	V	0,00-0,10	X

3.2.7 Eficiência edáfica

Para o cálculo da eficiência edáfica (E_E), foram utilizados os diferentes indicadores, referentes aos fatores limitantes, estimados pelos seguintes índices: (i) índice de suficiência hídrica (água) (I_W) e (ii) índice de suficiência de nutrientes minerais (I_N).

$$E_E = \sqrt[2]{I_W \cdot I_N} \quad (39)$$

Para o cálculo do índice de suficiência hídrica (I_W), tem-se que:

$$I_W = \frac{ETr_{PC}}{ETc_{PC}} \quad (40)$$

Para a avaliação da fertilidade do solo, foi definido o índice de deficiência de fertilidade do solo (I_{DF} , %) (adaptado de LANDELL et al., 2004) (Tabela 8).

Tabela 8 - Índice de deficiência de fertilidade do solo (I_{DF} , %) (adaptado de LANDELL et al., 2004).

Atributos	Solo	I_{DF} , %
ADA, e, ef, m, CTC média/alta	PVAe, PVe, LVe, LVAe, CXe, NVef, NVe, MT, MX, GMe, GXe, GMm, GXm	0
ADM, e, ef, CTC média/alta	PVAe, PVe, PAe, LVe, LVAe, CXe, NVef, NVe	10
ADA, m, mf, CTC média/alta	PVAm, PVm, PAm, LVmf, LVm, LVAm, LAm, CXm NVmf, NVm, PVAm	
ADM, mf, m, ma, CTC média/alta		
ADB, ef, e, CTC média/alta	LVef, LVe, LVAe, LAe, NVef, NVe, PVAe, PVe, PAe, CXe	20
ADM, m, mf, CTC média/baixa	PVAm, PVm, PAm, LVmf, LVm, LVAm, LAm, CXm	
ADA, ma, CTC média/alta	GMma, GXma	30
ADM, d, CTC média/alta	PVAd, PVd, PAd	
ADM, ma, CTC média/alta	LVAm, LAm	
ADB, d, df, CTC média/alta	LVd, LVdf, LVAd, LAd	40
ADB, e, CTC média/baixa	LVe, LVAe, LAe	
ADMB, ef, CTC média/alta	LVef	50
ADB, w, wf, CTC média/alta	LVwf, LVw, LVAw, Law	
ADM, a, CTC média/alta	PVAa, PVa, PAa	60
ADB, ma, CTC média/alta	LVma, LVAm, LAm	
ADB, e, CTC alta, A chernozêmico	RLe	70
ADB, a, CTC média/baixa	PVAa, PVa, PAa	
ADMB, ma, CTC média/baixa	PVAm, PVma, PAm	80
ADMB, wf, w, a, CTC média/alta	LVwf, LVw, LVAw, Law, LVa, LVAA, LAa	
ADMB, a, d, CTC média/baixa	PVAa, PVa, PVAa, PAa, RQa, RQd	
ADMB, e, m, d, ma, a	RLe, RLm, RLd, RLma, RLa, PVAe	90

ADA: água disponível alta; ADM: água disponível média; ADB: água disponível baixa; ADMB: água disponível muito baixa. LV: Latossolo Vermelho; LVA: Latossolo Vermelho Amarelo; LA: Latossolo Amarelo; PVA: Argissolo Vermelho Amarelo; PV: Argissolo Vermelho; PA: Argissolo Amarelo; NV: Nitossolo Vermelho; MT: Chernossolo Argilúvico; MX: Chernossolo Háptico; CX: Cambissolo Háptico; RQ: Neossolo Quartzarênico; RL: Neossolo Litólico; GX: Gleissolo Háptico; GM: Gleissolo Melânico. ef: eutrófico; e: eutrófico; mf: mesotrófico; m: mesotrófico; df: distroférrico; d: distrófico; wf: acriférrico; w: ácrico; ma: mesoálico; a: álico.

Para o cálculo do índice de suficiência de nutrientes minerais (I_N), tem-se que:

$$I_N = \frac{100 - I_{DF}}{100} \quad (41)$$

3.2.8 Eficiência de manejo agrícola

Para o cálculo da eficiência de manejo agrícola (E_M), foram utilizados os diferentes indicadores, referentes aos fatores de manejo, estimados pelos seguintes índices: (i) eficiência

de adequação de genótipo (E_G), (ii) índice de definição da época de semeadura (I_S), e (iii) índice de adequação de população e distribuição de plantas (I_P).

$$E_M = \sqrt[3]{E_G \cdot I_S \cdot I_P} \quad (42)$$

Para o cálculo da eficiência de manejo (E_M), foi utilizada a seguinte equação:

$$E_G \cdot I_S \cdot I_P = \frac{P_R}{P_I} \quad (43)$$

Para o cálculo da eficiência edáfica e de manejo (E_{EM}), foi utilizada a seguinte equação:

$$E_{EM} = \frac{P_R}{P_P} \quad (44)$$

em que P_R se refere à produtividade real (além dos fatores limitantes, há a limitação do manejo, como no controle de plantas daninhas, pragas e doenças, por exemplo) e P_I à produtividade obtenível.

A produtividade obtenível (P_I , kg ha⁻¹) é a produtividade obtida experimentalmente no experimento de campo em condição irrigada.

A produtividade real (P_R , kg ha⁻¹) é a produtividade obtida experimentalmente no experimento de campo em condição de sequeiro.

3.2.9 Eficiência de adequação do genótipo

Foram utilizados os seguintes parâmetros para avaliar a eficiência de adequação do genótipo da cultura de soja: (i) índice de área foliar, (ii) massa de matéria seca de parte aérea, (iii) massa de mil grãos, (iv) população final de plantas, (v) altura de inserção da primeira vagem, (vi) altura de planta, (vii) prolificidade e (viii) produtividade.

3.2.10 Índice de área foliar

A área foliar foi determinada por intermédio da coleta de folhas de três plantas ao acaso na área experimental útil, nos estádios fenológicos R_1 , R_3 e $R_{5.1}$ da cultura de soja (experimentos 1 e 2), utilizando um integrador de área foliar Li-COR, modelo LAI 2000 (Li-COR, 1996). O índice de área foliar (m² m⁻²) foi obtido utilizando a seguinte equação:

$$IAF = \frac{Af}{e_1 \cdot e_2} \quad (45)$$

em que A_f (m^2 planta⁻¹) se refere à área foliar média de uma planta de soja, e_1 (m) se refere ao espaçamento entre fileiras de plantas e e_2 (m) ao espaçamento entre plantas na fileira.

3.2.11 Massa de matéria seca de parte aérea

A massa de matéria seca de parte aérea de plantas de soja foi obtida por intermédio da coleta de três plantas ao acaso na área experimental útil nos estádios fenológicos R_1 , R_3 e $R_{5.1}$ da cultura de soja (experimentos 1 e 2), as quais foram acondicionadas em sacos de papel e secos em estufas de circulação forçada de ar a $65^\circ C \pm 5^\circ C$, até atingirem massa constante.

3.2.12 Massa de mil grãos

A massa de mil grãos foi mensurada por ocasião da colheita, em cinco plantas de soja ao acaso em cada parcela dentro da área experimental útil, e a sua determinação foi de acordo com a regra para análise de sementes (BRASIL, 1992).

3.2.13 População de plantas

A população de plantas de soja foi definida por ocasião da semeadura, onde foi utilizada a população ideal (ótima).

3.2.14 Altura de inserção da primeira vagem

A avaliação da altura de inserção da primeira vagem da planta de soja foi realizada por ocasião da colheita, em cinco plantas ao acaso em cada parcela dentro da área experimental útil, considerando a distância entre o colo da planta e o ponto de inserção da primeira vagem da planta amostrada, determinada através de régua graduada com precisão de 0,1 cm.

3.2.15 Altura de planta

A altura de planta foi determinada por ocasião da colheita, em cinco plantas de soja colhidas ao acaso, em cada parcela dentro da área experimental útil, considerando a distância entre a base da planta e seu ápice.

3.2.16 Componentes de produtividade

Os componentes de produtividade avaliados, por ocasião da colheita, foram: (i) número de vagens por planta, (ii) número de grãos por planta e (iii) massa de mil grãos. Foram mensurados por ocasião da colheita, em cinco plantas de soja ao acaso em cada parcela dentro da área experimental útil, e a sua determinação foi de acordo com a regra para análise de sementes (BRASIL, 1992).

3.2.17 Produtividade

A produtividade real de grãos (P_R , kg ha⁻¹) de soja foi obtida do produto colhido manualmente na área útil das parcelas com teor de água corrigido para 13% como segue:

$$P_R = \frac{(1 - u) \cdot P_u}{1 - u_d} \quad (46)$$

em que P_u se refere à produtividade (kg ha⁻¹) de grãos úmidos de soja com teor de água u , P_d à produtividade (kg ha⁻¹) de grãos úmidos corrigida para o teor de água desejado, u ao teor de água no grão colhido (kg kg⁻¹) e u_d ao teor de água desejado (kg kg⁻¹ - teor de água corrigido).

3.2.18 Fenologia

Foi realizada a caracterização dos estádios fenológicos diariamente conforme o desenvolvimento das plantas com base na escala fenológica de Fehr e Caviness (1977) para a cultura de soja.

3.2.19 Análise estatística

Foram verificados os pressupostos da análise de variância e, se necessário, foram realizadas as transformações pertinentes. Posteriormente, os dados foram submetidos a análise de variância (ANOVA). Quando foram detectadas diferenças significativas, as médias foram agrupadas pelo teste de Tukey ao nível de significância de 10% ($\alpha = 0,10$).

As análises foram realizadas utilizando o pacote estatístico do software R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2013).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Produtividade potencial da cultura de soja

Por definição, a produtividade potencial (P_P , kg ha⁻¹) de grãos úmidos de soja depende do genótipo e dos seguintes elementos do clima definidores de produtividade: (a) pressão parcial de dióxido de carbono (CO₂), (b) fotoperíodo (N, h d⁻¹), (c) radiação solar fotossinteticamente ativa (PAR, MJ m⁻² d⁻¹) e (d) temperatura do ar (T, °C).

A pressão parcial de dióxido de carbono foi considerada constante no presente trabalho.

A radiação solar fotossinteticamente ativa foi contemplada pelo modelo utilizado pela estimativa da radiação extraterrestre (Q_o, MJ m⁻² d⁻¹). A radiação solar global (Q_g, MJ m⁻² d⁻¹) é cerca de ½ da radiação extraterrestre. A radiação solar fotossinteticamente ativa é cerca de ½ da radiação global. Portanto, a radiação fotossinteticamente ativa é cerca de ¼ da radiação extraterrestre.

No presente trabalho, quanto ao genótipo, para estimar a produtividade potencial, foram utilizados os seguintes critérios: índice de área foliar máximo ótimo, duração do ciclo observada (DC, d), máximo índice de colheita observado entre os cultivares do ambiente de produção e a temperatura ótima.

A duração do ciclo (período, em dias, entre a emergência e a colheita) foi subdividida em fases (decêndios: período de dez dias, exceto a última fase) correspondente aos valores observados experimentalmente,

Para estimar a produtividade potencial de grãos úmidos de soja, foi utilizado o método da Zona Agroecológica descrito por Doorenbos e Kassam (1994). Quanto aos elementos do clima, foram usados os seguintes critérios: (i) insolação igual ao fotoperíodo (duração teórica máxima calculada em função da latitude e da declinação solar, que por sua vez depende do dia do ano) em todas as fases do ciclo, (ii) temperatura igual à temperatura ótima (27,9°C) em todas as fases do ciclo, e (iii) índice de área foliar máximo igual ao índice de área foliar máximo ótimo (5,29 m² m⁻²).

Para o cálculo da temperatura ótima da cultura de soja (T_o, °C), tem-se que:

$$\frac{dcTc}{dT} = 0,035 + 0,00650.T - 0,0002775.T^2 = 0 \quad (47)$$

$$T_o = \frac{-0,00650 - \sqrt{(0,00650)^2 - 4 \cdot (-0,0002775) \cdot (0,035)}}{2 \cdot (-0,0002775)} = 27,9^\circ C \quad (48)$$

e

$$\frac{dcTn}{dT} = 0,014 + 0,0026 \cdot T - 0,000111 \cdot T^2 = 0 \quad (49)$$

$$T_o = \frac{-0,0026 - \sqrt{(0,0026)^2 - 4 \cdot (-0,000111) \cdot (0,014)}}{2 \cdot (-0,000111)} = 27,9^\circ C \quad (50)$$

Sendo assim, verifica-se (raiz positiva – a raiz negativa foi descartada), em ambos os casos, que a temperatura ótima da cultura de soja é de 27,9°C.

Para o cálculo do índice de área foliar máximo ótimo (IAFo, m² m⁻²) da cultura de soja, tem-se que:

$$\frac{dC_{IAF}}{dIAF_{max}} = 0,185 - 0,0350 \cdot IAF_{max} = 0 \quad (51)$$

$$IAF_o = \frac{0,185}{0,0350} = 5,29 \quad (52)$$

Sendo assim, verifica-se que o índice de área foliar máximo ótimo da cultura de soja é de 5,29 m² m⁻².

No presente trabalho, designou-se como ambiente de produção a interação entre o genótipo (diferentes cultivares) e o ambiente caracterizado pelos elementos do clima definidores de produtividade previamente definidos. Sendo assim, para o cálculo da produtividade potencial da cultura de soja, foram designados cinco ambientes de produção (AP):

(AP 1) Safra 2016/2017 em Piracicaba, SP (Latitude: -22,725°). Cultivar de ciclo precoce: TMG-7161-RR;

(AP 2) Safra 2016/2017 em Leme, SP (Latitude: -22,1892°). Cultivar de ciclo precoce: TMG-7161-RR;

(AP 3) Safra 2016/2017 em Piracicaba, SP (Latitude: -22,725°). Cultivares de ciclo médio: BMX-Potência-RR, TMG-1067-RR, BMX-Ícone-RR e BMX-Power-RR;

(AP 4) Safra 2016/2017 em Leme, SP (Latitude: -22,1892°). Cultivares de ciclo médio: BMX-Potência-RR, TMG-1067-RR, BMX-Ícone-RR e BMX-Power-RR; e

(AP 5) Safra 2017/2018 em Piracicaba, SP (Latitude: -22,725°). Cultivar de ciclo precoce: BMX-Ativa-RR.

Os valores de duração do ciclo para os diferentes ambientes de produção foram de 123 (ambiente de produção 1), 127 (ambiente de produção 2), 140 (ambiente de produção 3), 139 (ambiente de produção 4) e 127 (ambiente de produção 5) dias (Tabela 9).

Os valores de produtividade potencial de grãos úmidos de soja (13% de umidade) para os ambientes de produção 1, 2, 3, 4 e 5 foram, respectivamente, 12.654 (Tabela 13), 13.012 (Tabela 14), 15.627 (Tabela 15), 14.549 (Tabela 16) e 12.589 (Tabela 17) kg ha⁻¹.

Nos experimentos conduzidos por Florêncio (2017) em Piracicaba-SP (sob irrigação) e em Leme-SP (sob condição de sequeiro) (experimentos A e B), na safra 2016/2017, foram utilizados 12 cultivares de soja com três diferentes durações de ciclo.

Em Piracicaba-SP, foram observadas as seguintes durações: 123, 140 e 127 dias, onde foram calculadas, respectivamente, os valores de produtividade potencial, 12.654, 15.627 e 12.589 kg ha⁻¹ (Tabela 9).

Observou-se que a produtividade potencial de soja aumenta com o aumento da duração de ciclo e do índice de colheita (Figuras 3 e 4). As Tabelas 13, 14, 15, 16 e 17 ilustram o cálculo da produtividade potencial de soja em função do índice de área foliar máximo ótimo, do índice de colheita máximo observado e da duração do ciclo observada em diferentes genótipos (diferenças em ciclo e em hábito de crescimento) (Tabela 9).

Tabela 9 - Valores estimados de produtividade potencial (P_p, kg ha⁻¹) em função do índice de área foliar máximo (IAFx, m² m⁻²), temperatura do ar (T, °C), insolação (n, h d⁻¹), duração do ciclo (DC, d) e índice de colheita (IC, kg kg⁻¹). Sistemas de produção (SP): irrigado (I) e sequeiro (S). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, SP (I) e Fazenda Cabeceira do Taquari, Leme, SP (S). Safra 2016/2017.

AP	SP	L	Semeadura	Colheita	Genótipo ^(a)	Ciclo	HC ^(b)	IAFo ^(c)	To ^(d)	N ^(e)	DC	IC	P _p
1	I	P	22/10/16	12/02/17	1	Precoce	I	5,29	27,9	13,11	123	0,53	12.654
2	S	L	28/10/16	22/02/17	1	Precoce	I	5,29	27,9	13,06	127	0,53	13.012
3	I	P	22/10/16	01/03/17	2/3/4/5	Médio	I/D/I/I	5,29	27,9	13,05	140	0,58	15.627
4	S	L	28/10/16	16/03/17	2/3/4/5	Médio	I/D/I/I	5,29	27,9	13,00	139	0,58	14.549
5	I/S	P	01/12/17	07/04/18	6	Precoce	D	5,29	27,9	12,77	127	0,53	12.589

^(a) Cultivares de soja: (1) TMG-7161-RR; (2) BMX-Potência-RR, (3) TMG-1067-RR, (4) BMX-Ícone-RR, (5) BMX-Power-RR e (6) BMX-Ativa-RR. ^(b) Hábito de crescimento determinado (D) e indeterminado (I). ^(c) índice de área foliar máximo igual ao índice de área foliar máximo ótimo. ^(d) Temperatura do ar igual à temperatura ótima da cultura de soja durante todo ciclo. ^(e) Insolação igual ao fotoperíodo durante todo ciclo.

Figura 3 - Valores de produtividade potencial (P_p , kg ha⁻¹) em função da (A) duração do ciclo (DC, d) e do (B) índice de colheita (IC, kg kg⁻¹). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Safra 2016/2017. Piracicaba-SP.

Em Leme-SP, foram observadas as seguintes durações: 127 e 139 dias, onde foram calculadas, respectivamente, os valores de produtividade potencial, 13.012 e 14.549 kg ha⁻¹ (Tabela 9). Observou-se que a produtividade potencial de soja aumenta com o aumento da duração de ciclo (Figura 4) e do índice de colheita. As Tabelas 13, 14, 15, 16 e 17 ilustram o cálculo da produtividade potencial de soja em função do índice de área foliar máximo, índice de colheita, duração do ciclo, produtividade potencial da cultura de soja e diferentes genótipos (ciclo e hábito de crescimento).

Figura 4 - Valores de produtividade potencial (P_p , kg ha⁻¹) em função da (A) duração do ciclo (DC, d) e do índice de colheita (IC, kg kg⁻¹). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Safra 2016/2017. Leme, SP.

No experimento conduzido em Piracicaba-SP, sob irrigação e sob condição de sequeiro, na safra 2017/2018, para o cálculo da produtividade potencial, foi utilizada o cultivar de soja BMX-Ativa-RR. Foi observada a duração de ciclo de 127 dias, onde foi calculado o valor de produtividade potencial de 12.589 kg ha⁻¹ (Tabela 9) utilizando o índice de colheita de 0,53 kg kg⁻¹ e índice de área foliar máximo (5,29 m² m⁻²).

Os valores de temperatura média e insolação referentes aos ambientes de produção 1 (safra 2016/2017 em Piracicaba, SP), 2 (safra 2016/2017 em Leme, SP), 3 (safra 2016/2017 em Piracicaba, SP), 4 (safra 2016/2017 em Leme, SP) e 5 (safra 2017/2018 em Piracicaba, SP) estão apresentados nas Tabelas 10, 11 e 12.

Tabela 10 - Valores de temperatura média (T, °C) e insolação (n, h d⁻¹). Ambientes de produção 1 a 3. Piracicaba-SP. Posto agrometeorológico. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Safra 2016/2017.

Data	i	T	n	Data	i	T	n	Data	i	T	n
22/10/2016	0	20,0	10,15	12/12/2016	51	24,5	13,24	01/02/2017	102	22,4	12,51
23/10/2016	1	20,0	9,73	13/12/2016	52	24,4	12,96	02/02/2017	103	21,8	10,51
24/10/2016	2	20,0	10,93	14/12/2016	53	24,0	13,25	03/02/2017	104	22,6	12,58
25/10/2016	3	20,0	9,69	15/12/2016	54	20,7	12,84	04/02/2017	105	22,9	12,74
26/10/2016	4	20,0	9,31	16/12/2016	55	21,4	12,08	05/02/2017	106	23,7	12,52
27/10/2016	5	20,0	10,90	17/12/2016	56	23,1	13,28	06/02/2017	107	23,8	11,80
28/10/2016	6	20,1	12,55	18/12/2016	57	23,7	12,88	07/02/2017	108	25,1	12,58
29/10/2016	7	18,8	12,66	19/12/2016	58	21,2	12,56	08/02/2017	109	25,6	12,56
30/10/2016	8	21,8	12,65	20/12/2016	59	22,1	12,90	09/02/2017	110	24,5	12,60
31/10/2016	9	23,2	12,63	21/12/2016	60	21,6	13,26	10/02/2017	111	24,9	12,59
01/11/2016	10	23,7	12,72	22/12/2016	61	23,8	12,95	11/02/2017	112	25,2	12,59
02/11/2016	11	22,9	12,44	23/12/2016	62	24,1	11,37	12/02/2017	113	25,3	12,49
03/11/2016	12	20,6	12,23	24/12/2016	63	25,1	13,27	13/02/2017	114	25,2	12,61
04/11/2016	13	20,3	12,70	25/12/2016	64	25,5	12,52	14/02/2017	115	25,1	12,44
05/11/2016	14	20,9	13,08	26/12/2016	65	24,7	13,28	15/02/2017	116	26,3	12,51
06/11/2016	15	21,7	11,83	27/12/2016	66	26,6	13,18	16/02/2017	117	26,3	12,29
07/11/2016	16	22,7	12,60	28/12/2016	67	26,0	13,04	17/02/2017	118	26,0	12,43
08/11/2016	17	23,8	12,66	29/12/2016	68	25,2	13,21	18/02/2017	119	25,6	11,93
09/11/2016	18	24,3	12,57	30/12/2016	69	25,3	13,21	19/02/2017	120	26,5	12,53
10/11/2016	19	24,2	12,89	31/12/2016	70	25,2	13,05	20/02/2017	121	27,8	12,46
11/11/2016	20	24,8	12,61	01/01/2017	71	25,7	13,13	21/02/2017	122	26,0	12,51
12/11/2016	21	21,6	12,64	02/01/2017	72	25,1	13,08	22/02/2017	123	25,9	12,43
13/11/2016	22	18,5	12,45	03/01/2017	73	25,8	12,71	23/02/2017	124	26,1	12,23
14/11/2016	23	18,3	11,79	04/01/2017	74	24,8	12,93	24/02/2017	125	22,8	11,90
15/11/2016	24	21,3	12,88	05/01/2017	75	23,7	13,06	25/02/2017	126	21,2	12,13
16/11/2016	25	23,7	12,92	06/01/2017	76	25,3	12,87	26/02/2017	127	21,4	11,28
17/11/2016	26	23,2	12,94	07/01/2017	77	25,9	13,06	27/02/2017	128	23,8	11,88
18/11/2016	27	20,2	12,84	08/01/2017	78	25,3	13,00	28/02/2017	129	24,8	12,23
19/11/2016	28	17,7	13,04	09/01/2017	79	22,2	8,97	01/03/2017	130	23,5	12,24
20/11/2016	29	19,9	13,11	10/01/2017	80	24,0	12,88	02/03/2017	131	22,5	10,76
21/11/2016	30	22,6	12,99	11/01/2017	81	23,8	12,72	03/03/2017	132	21,8	11,22
22/11/2016	31	22,3	11,80	12/01/2017	82	23,0	12,68	04/03/2017	133	23,2	11,69
23/11/2016	32	22,3	12,94	13/01/2017	83	22,9	12,52	05/03/2017	134	23,1	11,85
24/11/2016	33	24,0	13,21	14/01/2017	84	24,1	12,92	06/03/2017	135	22,5	10,41
25/11/2016	34	24,9	13,00	15/01/2017	85	23,5	12,91	07/03/2017	136	23,8	12,10
26/11/2016	35	24,5	12,76	16/01/2017	86	23,5	12,50	08/03/2017	137	23,3	12,07
27/11/2016	36	24,7	12,87	17/01/2017	87	21,9	12,45	09/03/2017	138	24,7	12,14
28/11/2016	37	24,4	12,17	18/01/2017	88	21,2	12,25	10/03/2017	139	26,4	12,03
29/11/2016	38	24,4	12,83	19/01/2017	89	21,1	11,98	11/03/2017	140	26,0	11,89
30/11/2016	39	18,7	12,98	20/01/2017	90	21,4	12,32	12/03/2017	141	26,2	12,03
01/12/2016	40	21,6	13,05	21/01/2017	91	21,0	12,43	13/03/2017	142	24,4	11,75
02/12/2016	41	24,0	13,04	22/01/2017	92	20,4	12,54	14/03/2017	143	23,0	10,20
03/12/2016	42	23,2	10,59	23/01/2017	93	21,6	12,47	15/03/2017	144	23,2	11,93
04/12/2016	43	21,9	13,17	24/01/2017	94	23,8	12,78	16/03/2017	145	24,8	11,90
05/12/2016	44	23,2	13,18	25/01/2017	95	23,7	12,69	17/03/2017	146	25,0	11,78
06/12/2016	45	25,2	13,23	26/01/2017	96	21,7	12,69	18/03/2017	147	22,0	10,86
07/12/2016	46	24,5	10,96	27/01/2017	97	22,2	12,75	19/03/2017	148	20,8	11,47
08/12/2016	47	23,9	13,03	28/01/2017	98	25,6	12,70	20/03/2017	149	21,7	11,81
09/12/2016	48	22,8	12,98	29/01/2017	99	25,8	12,90	21/03/2017	150	21,4	11,82
10/12/2016	49	23,4	13,04	30/01/2017	100	25,2	12,65	22/03/2017	151	22,4	11,80
11/12/2016	50	23,3	12,92	31/01/2017	101	22,3	12,08	23/03/2017	152	20,0	9,11
								24/03/2017	153	20,0	10,81

Tabela 11 - Valores de temperatura média (T, °C) e insolação (n, h d⁻¹). Ambientes de produção 4 a 6. Leme-SP. Posto agrometeorológico. Fazenda Cabeceira do Taquari. Safra 2016/2017.

Data	i	T	n	Data	i	T	n	Data	i	T	n
28/10/2016	0	20,1	12,55	18/12/2016	51	23,7	12,88	07/02/2017	102	25,1	12,58
29/10/2016	1	18,8	12,66	19/12/2016	52	21,2	12,56	08/02/2017	103	25,6	12,56
30/10/2016	2	21,8	12,65	20/12/2016	53	22,1	12,90	09/02/2017	104	24,5	12,60
31/10/2016	3	23,2	12,63	21/12/2016	54	21,6	13,26	10/02/2017	105	24,9	12,59
01/11/2016	4	23,7	12,72	22/12/2016	55	23,8	12,95	11/02/2017	106	25,2	12,59
02/11/2016	5	22,9	12,44	23/12/2016	56	24,1	11,37	12/02/2017	107	25,3	12,49
03/11/2016	6	20,6	12,23	24/12/2016	57	25,1	13,27	13/02/2017	108	25,2	12,61
04/11/2016	7	20,3	12,70	25/12/2016	58	25,5	12,52	14/02/2017	109	25,1	12,44
05/11/2016	8	20,9	13,08	26/12/2016	59	24,7	13,28	15/02/2017	110	26,3	12,51
06/11/2016	9	21,7	11,83	27/12/2016	60	26,6	13,18	16/02/2017	111	26,3	12,29
07/11/2016	10	22,7	12,60	28/12/2016	61	26,0	13,04	17/02/2017	112	26,0	12,43
08/11/2016	11	23,8	12,66	29/12/2016	62	25,2	13,21	18/02/2017	113	25,6	11,93
09/11/2016	12	24,3	12,57	30/12/2016	63	25,3	13,21	19/02/2017	114	26,5	12,53
10/11/2016	13	24,2	12,89	31/12/2016	64	25,2	13,05	20/02/2017	115	27,8	12,46
11/11/2016	14	24,8	12,61	01/01/2017	65	25,7	13,13	21/02/2017	116	26,0	12,51
12/11/2016	15	21,6	12,64	02/01/2017	66	25,1	13,08	22/02/2017	117	25,9	12,43
13/11/2016	16	18,5	12,45	03/01/2017	67	25,8	12,71	23/02/2017	118	26,1	12,23
14/11/2016	17	18,3	11,79	04/01/2017	68	24,8	12,93	24/02/2017	119	22,8	11,90
15/11/2016	18	21,3	12,88	05/01/2017	69	23,7	13,06	25/02/2017	120	21,2	12,13
16/11/2016	19	23,7	12,92	06/01/2017	70	25,3	12,87	26/02/2017	121	21,4	11,28
17/11/2016	20	23,2	12,94	07/01/2017	71	25,9	13,06	27/02/2017	122	23,8	11,88
18/11/2016	21	20,2	12,84	08/01/2017	72	25,3	13,00	28/02/2017	123	24,8	12,23
19/11/2016	22	17,7	13,04	09/01/2017	73	22,2	8,97	01/03/2017	124	23,5	12,24
20/11/2016	23	19,9	13,11	10/01/2017	74	24,0	12,88	02/03/2017	125	22,5	10,76
21/11/2016	24	22,6	12,99	11/01/2017	75	23,8	12,72	03/03/2017	126	21,8	11,22
22/11/2016	25	22,3	11,80	12/01/2017	76	23,0	12,68	04/03/2017	127	23,2	11,69
23/11/2016	26	22,3	12,94	13/01/2017	77	22,9	12,52	05/03/2017	128	23,1	11,85
24/11/2016	27	24,0	13,21	14/01/2017	78	24,1	12,92	06/03/2017	129	22,5	10,41
25/11/2016	28	24,9	13,00	15/01/2017	79	23,5	12,91	07/03/2017	130	23,8	12,10
26/11/2016	29	24,5	12,76	16/01/2017	80	23,5	12,50	08/03/2017	131	23,3	12,07
27/11/2016	30	24,7	12,87	17/01/2017	81	21,9	12,45	09/03/2017	132	24,7	12,14
28/11/2016	31	24,4	12,17	18/01/2017	82	21,2	12,25	10/03/2017	133	26,4	12,03
29/11/2016	32	24,4	12,83	19/01/2017	83	21,1	11,98	11/03/2017	134	26,0	11,89
30/11/2016	33	18,7	12,98	20/01/2017	84	21,4	12,32	12/03/2017	135	26,2	12,03
01/12/2016	34	21,6	13,05	21/01/2017	85	21,0	12,43	13/03/2017	136	24,4	11,75
02/12/2016	35	24,0	13,04	22/01/2017	86	20,4	12,54	14/03/2017	137	23,0	10,20
03/12/2016	36	23,2	10,59	23/01/2017	87	21,6	12,47	15/03/2017	138	23,2	11,93
04/12/2016	37	21,9	13,17	24/01/2017	88	23,8	12,78	16/03/2017	139	24,8	11,90
05/12/2016	38	23,2	13,18	25/01/2017	89	23,7	12,69	17/03/2017	140	25,0	11,78
06/12/2016	39	25,2	13,23	26/01/2017	90	21,7	12,69	18/03/2017	141	22,0	10,86
07/12/2016	40	24,5	10,96	27/01/2017	91	22,2	12,75	19/03/2017	142	20,8	11,47
08/12/2016	41	23,9	13,03	28/01/2017	92	25,6	12,70	20/03/2017	143	21,7	11,81
09/12/2016	42	22,8	12,98	29/01/2017	93	25,8	12,90	21/03/2017	144	21,4	11,82
10/12/2016	43	23,4	13,04	30/01/2017	94	25,2	12,65	22/03/2017	145	22,4	11,80
11/12/2016	44	23,3	12,92	31/01/2017	95	22,3	12,08	23/03/2017	146	20,0	9,65
12/12/2016	45	24,5	13,24	01/02/2017	96	22,4	12,51	24/03/2017	147	20,0	10,97
13/12/2016	46	24,4	12,96	02/02/2017	97	21,8	10,51	25/03/2017	148	20,0	10,19
14/12/2016	47	24,0	13,25	03/02/2017	98	22,6	12,58	26/03/2017	149	20,0	10,09
15/12/2016	48	20,7	12,84	04/02/2017	99	22,9	12,74	27/03/2017	150	20,0	10,21
16/12/2016	49	21,4	12,08	05/02/2017	100	23,7	12,52	28/03/2017	151	20,0	10,91
17/12/2016	50	23,1	13,28	06/02/2017	101	23,8	11,80	29/03/2017	152	20,0	10,55

Tabela 12 - Valores de temperatura média (T, °C) e insolação (n, h d⁻¹). Ambientes de produção 7 e 8. Piracicaba-SP. Posto agrometeorológico. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Safra 2017/2018.

Data	i	T	n	Data	i	T	n	Data	i	T	n
01/12/2017	0	22,8	3,60	20/01/2018	50	26,1	7,80	11/03/2018	100	25,6	11,30
02/12/2017	1	23,6	4,30	21/01/2018	51	27,0	10,20	12/03/2018	101	26,6	10,50
03/12/2017	2	25,4	9,20	22/01/2018	52	27,2	5,70	13/03/2018	102	26,9	8,00
04/12/2017	3	25,9	11,60	23/01/2018	53	26,9	9,40	14/03/2018	103	27,7	8,30
05/12/2017	4	26,3	9,00	24/01/2018	54	26,1	6,10	15/03/2018	104	26,6	7,40
06/12/2017	5	26,1	5,40	25/01/2018	55	26,4	8,00	16/03/2018	105	26,8	7,30
07/12/2017	6	24,6	0,90	26/01/2018	56	25,5	9,70	17/03/2018	106	26,5	9,90
08/12/2017	7	26,2	7,40	27/01/2018	57	25,4	7,50	18/03/2018	107	26,6	10,00
09/12/2017	8	25,3	11,40	28/01/2018	58	26,1	3,90	19/03/2018	108	27,4	7,70
10/12/2017	9	25,5	10,00	29/01/2018	59	26,0	3,70	20/03/2018	109	27,4	6,40
11/12/2017	10	26,2	11,00	30/01/2018	60	20,8	0,00	21/03/2018	110	24,5	7,00
12/12/2017	11	23,4	9,70	31/01/2018	61	22,6	11,20	22/03/2018	111	24,4	9,10
13/12/2017	12	24,2	11,70	01/02/2018	62	23,8	11,20	23/03/2018	112	26,0	9,10
14/12/2017	13	25,2	10,60	02/02/2018	63	23,8	7,20	24/03/2018	113	25,7	9,70
15/12/2017	14	26,2	8,00	03/02/2018	64	24,7	10,10	25/03/2018	114	25,3	9,50
16/12/2017	15	26,6	9,10	04/02/2018	65	24,3	10,00	26/03/2018	115	25,1	4,80
17/12/2017	16	27,1	8,20	05/02/2018	66	23,6	4,10	27/03/2018	116	23,7	3,30
18/12/2017	17	27,1	9,20	06/02/2018	67	23,2	7,00	28/03/2018	117	24,8	8,00
19/12/2017	18	26,9	7,80	07/02/2018	68	23,6	12,00	29/03/2018	118	24,9	9,10
20/12/2017	19	25,5	4,70	08/02/2018	69	24,8	11,60	30/03/2018	119	25,7	7,50
21/12/2017	20	21,0	0,00	09/02/2018	70	25,8	11,50	31/03/2018	120	24,7	4,20
22/12/2017	21	23,8	1,90	10/02/2018	71	26,1	4,70	01/04/2018	121	24,7	4,50
23/12/2017	22	25,5	6,90	11/02/2018	72	26,4	4,90	02/04/2018	122	24,3	4,40
24/12/2017	23	26,0	9,50	12/02/2018	73	26,2	7,60	03/04/2018	123	22,7	4,60
25/12/2017	24	25,0	2,10	13/02/2018	74	23,7	2,10	04/04/2018	124	24,0	8,80
26/12/2017	25	25,7	10,70	14/02/2018	75	21,5	0,00	05/04/2018	125	23,0	10,30
27/12/2017	26	26,3	10,20	15/02/2018	76	22,0	0,20	06/04/2018	126	22,9	11,30
28/12/2017	27	26,5	5,00	16/02/2018	77	23,4	9,70	07/04/2018	127	24,0	12,00
29/12/2017	28	24,2	1,40	17/02/2018	78	24,0	8,80	08/04/2018	128	20,0	11,61
30/12/2017	29	22,4	0,00	18/02/2018	79	22,3	0,00	09/04/2018	129	20,0	10,83
31/12/2017	30	24,4	1,70	19/02/2018	80	23,6	3,10	10/04/2018	130	20,0	9,19
01/01/2018	31	24,6	3,50	20/02/2018	81	24,9	2,80	11/04/2018	131	20,0	10,87
02/01/2018	32	25,2	6,20	21/02/2018	82	25,3	10,80	12/04/2018	132	20,0	9,70
03/01/2018	33	25,1	5,40	22/02/2018	83	25,1	11,10	13/04/2018	133	20,0	9,82
04/01/2018	34	25,4	12,00	23/02/2018	84	25,0	10,30	14/04/2018	134	20,0	9,72
05/01/2018	35	24,8	11,40	24/02/2018	85	24,8	9,80	15/04/2018	135	20,0	10,84
06/01/2018	36	24,4	3,20	25/02/2018	86	24,3	8,70	16/04/2018	136	20,0	10,31
07/01/2018	37	20,9	0,90	26/02/2018	87	23,4	2,70	17/04/2018	137	20,0	9,57
08/01/2018	38	21,5	0,00	27/02/2018	88	23,3	1,60	18/04/2018	138	20,0	10,07
09/01/2018	39	22,8	1,60	28/02/2018	89	25,5	8,20	19/04/2018	139	20,0	10,49
10/01/2018	40	25,0	7,80	01/03/2018	90	26,5	6,30	20/04/2018	140	20,0	10,25
11/01/2018	41	25,0	4,90	02/03/2018	91	25,4	10,00	21/04/2018	141	20,0	9,13
12/01/2018	42	22,8	1,50	03/03/2018	92	25,6	9,30	22/04/2018	142	20,0	9,94
13/01/2018	43	24,0	4,10	04/03/2018	93	27,1	9,70	23/04/2018	143	20,0	10,11
14/01/2018	44	23,9	4,10	05/03/2018	94	26,2	10,20	24/04/2018	144	20,0	9,44
15/01/2018	45	25,5	7,00	06/03/2018	95	26,4	8,30	25/04/2018	145	20,0	9,67
16/01/2018	46	24,8	5,80	07/03/2018	96	26,3	6,80	26/04/2018	146	20,0	10,34
17/01/2018	47	26,5	11,50	08/03/2018	97	24,7	9,70	27/04/2018	147	20,0	10,13
18/01/2018	48	26,7	5,90	09/03/2018	98	24,4	10,70	28/04/2018	148	20,0	9,21
19/01/2018	49	25,6	3,70	10/03/2018	99	25,0	6,20	29/04/2018	149	20,0	10,15

Tabela 13 - Produtividade potencial da cultura de soja em função do fotoperíodo ($N, h d^{-1}$), insolação ($n, h d^{-1}$) (igual ao fotoperíodo), temperatura ($T, ^\circ C$) (igual à temperatura ótima da cultura de soja), índice de área foliar máximo ($IAFx, m^2 m^{-2}$) (igual ao índice de área foliar máximo ótimo) e duração do ciclo (DC, d). Ambiente de produção 1. Cultivar TMG-7161-RR. Safra 2016/2017. Piracicaba, SP (Latitude: $-22,725^\circ$).

Dec	Data	i	N	Qo	T	n	CTc	CTn	PPBc	PPBn	PPBp	CR	Δt	PPBp.CR. Δt
S	18/10/2016	292												
1	22/10/2016	296												
2	01/11/2016	301	12,82	40,06	27,9	12,82	1,45	1,18	657,41	0,00	657,41	0,50	10	3,287
3	11/11/2016	311	13,00	40,99	27,9	13,00	1,45	1,18	669,12	0,00	669,12	0,50	10	3,346
4	21/11/2016	321	13,16	41,71	27,9	13,16	1,45	1,18	678,14	0,00	678,14	0,50	10	3,391
5	01/12/2016	331	13,28	42,23	27,9	13,28	1,45	1,18	684,68	0,00	684,68	0,50	10	3,423
6	11/12/2016	341	13,36	42,57	27,9	13,36	1,45	1,18	688,93	0,00	688,93	0,50	10	3,445
7	21/12/2016	351	13,39	42,75	27,9	13,39	1,45	1,18	691,08	0,00	691,08	0,50	10	3,455
8	31/12/2016	361	13,38	42,75	27,9	13,38	1,45	1,18	691,19	0,00	691,19	0,50	10	3,456
9	10/01/2017	5	13,33	42,62	27,9	13,33	1,45	1,18	689,50	0,00	689,50	0,50	10	3,448
10	20/01/2017	15	13,24	42,30	27,9	13,24	1,45	1,18	685,50	0,00	685,50	0,50	10	3,428
11	30/01/2017	25	13,11	41,78	27,9	13,11	1,45	1,18	679,05	0,00	679,05	0,50	10	3,395
12	09/02/2017	35	12,94	41,05	27,9	12,94	1,45	1,18	669,88	0,00	669,88	0,50	10	3,349
13	19/02/2017	45	12,76	40,09	27,9	12,76	1,45	1,18	657,79	0,00	657,79	0,50	10	3,289
14	22/02/2017	48	12,70	39,75	27,9	12,70	1,45	1,18	653,57	0,00	653,57	0,50	3	980
C	22/02/2017	48	13,11	41,59	27,9	13,11		DC	PP	IAFx	CIAF	IC	u	41,692
			1613	5115		1613		123	12,654	5,29	0,50	0,53	0,13	

Tabela 14 - Produtividade potencial da cultura de soja em função do fotoperíodo ($N, h d^{-1}$), insolação ($n, h d^{-1}$) (igual ao fotoperíodo), temperatura ($T, ^{\circ}C$) (igual à temperatura ótima da cultura de soja), índice de área foliar máximo ($IAFx, m^2 m^{-2}$) (igual ao índice de área foliar máximo ótimo) e duração do ciclo (DC, d). Ambiente de produção 2. Cultivar TMG-7161-RR. Safra 2016/2017. Leme, SP (Latitude: $-22,1892^{\circ}$).

Dec	Data	i	N	Qo	T	n	CTc	CTn	PPBc	PPBn	PPBp	CR	Δt	PPBp.CR. Δt
S	18/10/2016	292												
1	28/10/2016	302												
2	07/11/2016	307	12,91	40,62	27,9	12,91	1,45	1,18	664,44	0,00	664,44	0,50	10	3.322
3	17/11/2016	317	13,07	41,39	27,9	13,07	1,45	1,18	674,15	0,00	674,15	0,50	10	3.371
4	27/11/2016	327	13,20	41,97	27,9	13,20	1,45	1,18	681,35	0,00	681,35	0,50	10	3.407
5	07/12/2016	337	13,30	42,36	27,9	13,30	1,45	1,18	686,28	0,00	686,28	0,50	10	3.431
6	17/12/2016	347	13,35	42,59	27,9	13,35	1,45	1,18	689,13	0,00	689,13	0,50	10	3.446
7	27/12/2016	357	13,36	42,66	27,9	13,36	1,45	1,18	690,04	0,00	690,04	0,50	10	3.450
8	06/01/2017	1	13,32	42,59	27,9	13,32	1,45	1,18	689,18	0,00	689,18	0,50	10	3.446
9	16/01/2017	11	13,25	42,36	27,9	13,25	1,45	1,18	686,27	0,00	686,27	0,50	10	3.431
10	26/01/2017	21	13,13	41,95	27,9	13,13	1,45	1,18	681,10	0,00	681,10	0,50	10	3.405
11	05/02/2017	31	12,99	41,33	27,9	12,99	1,45	1,18	673,38	0,00	673,38	0,50	10	3.367
12	15/02/2017	41	12,81	40,49	27,9	12,81	1,45	1,18	662,88	0,00	662,88	0,50	10	3.314
13	25/02/2017	51	12,62	39,42	27,9	12,62	1,45	1,18	649,42	0,00	649,42	0,50	10	3.247
14	04/03/2017	58	12,48	38,52	27,9	12,48	1,45	1,18	638,22	0,00	638,22	0,50	7	2.234
C	04/03/2017	58	13,06	41,40	27,9	13,06		DC	PP	IAFx	CIAF	IC	u	42.872
			1659	5258		1659		127	13.012	5,29	0,50	0,53	0,13	

Tabela 15 - Produtividade potencial da cultura de soja em função do fotoperíodo ($N, h d^{-1}$), insolação ($n, h d^{-1}$) (igual ao fotoperíodo), temperatura ($T, ^\circ C$) (igual à temperatura ótima da cultura de soja), índice de área foliar máximo ($IAFx, m^2 m^{-2}$) (igual ao índice de área foliar máximo ótimo) e duração do ciclo (DC, d). Ambiente de produção 3. Cultivares BMX-Potência-RR, TMG-1067-RR, BMX-Ícone-RR e BMX-Power-RR. Safra 2016/2017. Piracicaba, SP (Latitude: -22,725°).

Dec	Data	i	N	Qo	T	n	CTc	CTn	PPBc	PPBn	PPBp	CR	Δt	PPBp.CR. Δt
S	18/10/2016	292												
1	22/10/2016	296												
2	01/11/2016	301	12,82	40,06	27,9	12,82	1,45	1,18	657,41	0,00	657,41	0,50	10	3,287
3	11/11/2016	311	13,00	40,99	27,9	13,00	1,45	1,18	669,12	0,00	669,12	0,50	10	3,346
4	21/11/2016	321	13,16	41,71	27,9	13,16	1,45	1,18	678,14	0,00	678,14	0,50	10	3,391
5	01/12/2016	331	13,28	42,23	27,9	13,28	1,45	1,18	684,68	0,00	684,68	0,50	10	3,423
6	11/12/2016	341	13,36	42,57	27,9	13,36	1,45	1,18	688,93	0,00	688,93	0,50	10	3,445
7	21/12/2016	351	13,39	42,75	27,9	13,39	1,45	1,18	691,08	0,00	691,08	0,50	10	3,455
8	31/12/2016	361	13,38	42,75	27,9	13,38	1,45	1,18	691,19	0,00	691,19	0,50	10	3,456
9	10/01/2017	5	13,33	42,62	27,9	13,33	1,45	1,18	689,50	0,00	689,50	0,50	10	3,448
10	20/01/2017	15	13,24	42,30	27,9	13,24	1,45	1,18	685,50	0,00	685,50	0,50	10	3,428
11	30/01/2017	25	13,11	41,78	27,9	13,11	1,45	1,18	679,05	0,00	679,05	0,50	10	3,395
12	09/02/2017	35	12,94	41,05	27,9	12,94	1,45	1,18	669,88	0,00	669,88	0,50	10	3,349
13	19/02/2017	45	12,76	40,09	27,9	12,76	1,45	1,18	657,79	0,00	657,79	0,50	10	3,289
14	01/03/2017	55	12,55	38,88	27,9	12,55	1,45	1,18	642,67	0,00	642,67	0,50	10	3,213
15	11/03/2017	65	12,34	37,44	27,9	12,34	1,45	1,18	624,63	0,00	624,63	0,50	10	3,123
C	11/03/2017	65	13,05	41,23	27,9	13,05		DC	PP	IAFx	CIAF	IC	u	47,048
			1,827	5,772		1,827		140	15,627	5,29	0,50	0,58	0,13	

Tabela 16 - Produtividade potencial da cultura de soja em função do fotoperíodo ($N, h d^{-1}$), insolação ($n, h d^{-1}$) (igual ao fotoperíodo), temperatura ($T, ^{\circ}C$) (igual à temperatura ótima da cultura de soja), índice de área foliar máximo ($IAFx, m^2 m^{-2}$) (igual ao índice de área foliar máximo ótimo) e duração do ciclo (DC, d). Ambiente de produção 4. Cultivares BMX-Potência-RR, TMG-1067-RR, BMX-Ícone-RR e BMX-Power-RR. Safra 2016/2017. Leme, SP (Latitude: -22,1892°).

Dec	Data	i	N	Qo	T	n	CTc	CTn	PPBc	PPBn	PPBp	CR	Δt	PPBp.CR. Δt
S	18/10/2016	292												
1	28/10/2016	302												
2	07/11/2016	307	12,91	40,62	27,9	12,9	1,45	1,18	664,44	0,00	664,44	0,50	10	3.322
3	17/11/2016	317	13,07	41,39	27,9	13,1	1,45	1,18	674,15	0,00	674,15	0,50	10	3.371
4	27/11/2016	327	13,20	41,97	27,9	13,2	1,45	1,18	681,35	0,00	681,35	0,50	10	3.407
5	07/12/2016	337	13,30	42,36	27,9	13,3	1,45	1,18	686,28	0,00	686,28	0,50	10	3.431
6	17/12/2016	347	13,35	42,59	27,9	13,3	1,45	1,18	689,13	0,00	689,13	0,50	10	3.446
7	27/12/2016	357	13,36	42,66	27,9	13,4	1,45	1,18	690,04	0,00	690,04	0,50	10	3.450
8	06/01/2017	1	13,32	42,59	27,9	13,3	1,45	1,18	689,18	0,00	689,18	0,50	10	3.446
9	16/01/2017	11	13,25	42,36	27,9	13,2	1,45	1,18	686,27	0,00	686,27	0,50	10	3.431
10	26/01/2017	21	13,13	41,95	27,9	13,1	1,45	1,18	681,10	0,00	681,10	0,50	10	3.405
11	05/02/2017	31	12,99	41,33	27,9	13,0	1,45	1,18	673,38	0,00	673,38	0,50	10	3.367
12	15/02/2017	41	12,81	40,49	27,9	12,8	1,45	1,18	662,88	0,00	662,88	0,50	10	3.314
13	25/02/2017	51	12,62	39,42	27,9	12,6	1,45	1,18	649,42	0,00	649,42	0,50	10	3.247
14	07/03/2017	61	12,41	38,11	27,9	12,4	1,45	1,18	632,99	0,00	632,99	0,50	10	3.165
15	16/03/2017	70	12,22	36,74	27,9	12,2	1,45	1,18	615,84	0,00	615,84	0,50	9	2.771
C	16/03/2017	70	13,00	41,04	27,9	13,00		DC	PP	IAFx	CIAF	IC	n	43.803
			1806	5705		1806		139	14.549	5,29	0,50	0,58	0,13	

Tabela 17 - Produtividade potencial da cultura de soja em função do fotoperíodo ($N, h d^{-1}$), insolação ($n, h d^{-1}$) (igual ao fotoperíodo), temperatura ($T, ^\circ C$) (igual à temperatura ótima da cultura de soja), índice de área foliar máximo ($IAFx, m^2 m^{-2}$) (igual ao índice de área foliar máximo ótimo) e duração do ciclo (DC, d). Ambiente de produção 5. Cultivar BMX-Ativa-RR. Safra 2017/2018, Piracicaba, SP (Latitude: $-22,725^\circ$).

Dec	Data	i	N	Qo	T	n	CTc	CTn	PPBc	PPBn	PPBp	CR	Δt	PPBp.CR. Δt
S	18/10/2016	292												
1	01/12/2017	335												
2	11/12/2017	340	13,35	42,55	27,9	13,4	1,45	1,18	688,60	0,00	688,60	0,50	10	3443
3	21/12/2017	350	13,39	42,74	27,9	13,4	1,45	1,18	690,96	0,00	690,96	0,50	10	3455
4	31/12/2017	360	13,39	42,76	27,9	13,4	1,45	1,18	691,27	0,00	691,27	0,50	10	3456
5	10/01/2018	5	13,33	42,62	27,9	13,3	1,45	1,18	689,50	0,00	689,50	0,50	10	3448
6	20/01/2018	15	13,24	42,30	27,9	13,2	1,45	1,18	685,50	0,00	685,50	0,50	10	3428
7	30/01/2018	25	13,11	41,78	27,9	13,1	1,45	1,18	679,05	0,00	679,05	0,50	10	3395
8	09/02/2018	35	12,94	41,05	27,9	12,9	1,45	1,18	669,88	0,00	669,88	0,50	10	3349
9	19/02/2018	45	12,76	40,09	27,9	12,8	1,45	1,18	657,79	0,00	657,79	0,50	10	3289
10	01/03/2018	55	12,55	38,88	27,9	12,6	1,45	1,18	642,67	0,00	642,67	0,50	10	3213
11	11/03/2018	65	12,34	37,44	27,9	12,3	1,45	1,18	624,63	0,00	624,63	0,50	10	3123
12	21/03/2018	75	12,11	35,79	27,9	12,1	1,45	1,18	604,00	0,00	604,00	0,50	10	3020
13	31/03/2018	85	11,89	33,98	27,9	11,9	1,45	1,18	581,36	0,00	581,36	0,50	10	2907
14	10/04/2018	95	11,66	32,08	27,9	11,7	1,45	1,18	557,52	0,00	557,52	0,50	7	1951
C	10/04/2018	95	12,77	39,54	27,9	12,77		DC	PP	IAFx	CIAF	IC	u	41477
			1622	5022		1622		127	12589	5,29	0,50	0,53	0,13	

4.1.1 Eficiência climática

Os valores de eficiência climática referentes aos diferentes ambientes de produção estão apresentados na Tabela 18. Tais valores são estimados onde foram conduzidos os experimentos com irrigação onde a produtividade obtenível é determinada experimentalmente.

Sendo assim, como há irrigação, adubação e controle fitossanitário, assume-se que a perda de produtividade por deficiência hídrica e nutricional é minimizada e a perda de produtividade se deve principalmente aos elementos do clima (elementos do clima definidores de produtividade potencial) e do genótipo.

No caso específico deste trabalho, os principais fatores inerentes à interação genótipo-ambiente foram temperatura do ar, temperatura ótima do genótipo, índice de área foliar máximo, índice de área foliar máximo do genótipo, índice de colheita, insolação, fotoperíodo (depende do local – latitude – e da época do ano – declinação solar) e manejo.

Em média, a eficiência climática foi de 33,4%. Verifica-se valores de eficiência climática inferiores à média nos ambientes de produção 1 e 3. O ambiente de produção 5 foi o que apresentou maior eficiência climática.

Tabela 18 - Valores estimados de eficiência climática (E_c , kg kg^{-1}) em função da produtividade potencial (P_p , kg ha^{-1}), produtividade obtenível (P_i , kg ha^{-1}), índice de área foliar máximo (IAFx, $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$), temperatura do ar (T , $^{\circ}\text{C}$), insolação (n , h d^{-1}), duração do ciclo (DC, d) e índice de colheita (IC, kg kg^{-1}). Sistemas de produção (SP): irrigado (I). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, SP (P). Safras 2016/2017 e 2017/2018.

AP	SP	L	Semeadura	Cultivar	C ^(a)	HC ^(b)	IAFo ^(c)	To ^(d)	N ^(e)	DC	IC	P _p	P _i	E _c
1	I	P	22/10/16	TMG-7161-RR	P	I	5,29	27,9	13,11	123	0,53	12.654	4.134	32,7%
3	I	P	22/10/16	BMX-Potência-RR	M	I	5,29	27,9	13,05	140	0,58	15.627	4.771	30,5%
3	I	P	22/10/16	TMG-1067-RR	M	D	5,29	27,9	13,05	140	0,58	15.627	5.052	32,3%
3	I	P	22/10/16	BMX-Ícone-RR	M	I	5,29	27,9	13,05	140	0,58	15.627	5.003	32,0%
3	I	P	22/10/16	BMX-Power-RR	M	I	5,29	27,9	13,05	140	0,58	15.627	4.663	29,8%
5	I	P	01/12/17	BMX-Ativa-RR	P	D	5,29	27,9	12,77	127	0,53	12.589	5.400	42,9%

^(a) Ciclo precoce (P) e médio (M). ^(b) Hábito de crescimento determinado (D) e indeterminado (I). ^(c) índice de área foliar máximo igual ao índice de área foliar máximo ótimo. ^(d) Temperatura do ar igual à temperatura ótima da cultura de soja durante todo ciclo. ^(e) Insolação igual ao fotoperíodo durante todo ciclo.

4.1.2 Eficiência edafoclimática

Os valores de eficiência edafoclimática referentes aos diferentes ambientes de produção estão apresentados na Tabela 19. Tais valores são estimados onde foram conduzidos os experimentos de sequeiro onde a produtividade real é determinada experimentalmente.

Sendo assim, como não há irrigação, assume-se que pode ocorrer perda de produtividade por deficiência hídrica e nutricional (deficiência de nutrientes), além da perda de produtividade devido aos elementos do clima (elementos do clima definidores de produtividade potencial) e ao genótipo.

Em média, a eficiência edafoclimática foi de 29,7%. Verifica-se valores de eficiência edafoclimática inferiores à média no ambiente de produção 4. O ambiente de produção 5 foi também o que apresentou maior eficiência edafoclimática.

Tabela 19 - Valores estimados de eficiência edafoclimática (E_E , kg kg^{-1}) em função da produtividade real (P_R , kg ha^{-1}), produtividade real (P_R , kg ha^{-1}), índice de área foliar máximo (IAF_x , $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$), temperatura do ar (T , $^{\circ}\text{C}$), insolação (n , h d^{-1}), duração do ciclo (DC , d) e índice de colheita (IC , kg kg^{-1}). Sistemas de produção (SP): sequeiro (S). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, SP (P) e Fazenda Cabeceira do Taquari, Leme, SP (L). Safras 2016/2017 e 2017/2018.

AP	SP	L	Semeadura	Cultivar	C ^(a)	HC ^(b)	IAFo ^(c)	To ^(d)	N ^(e)	DC	IC	P _P	P _R	E _E
2	S	L	28/10/16	TMG-7161-RR	P	I	5,29	27,9	13,06	127	0,53	13.012	3.873	29,8%
4	S	L	28/10/16	BMX-Potência-RR	M	I	5,29	27,9	13,00	139	0,58	14.549	4.089	28,1%
4	S	L	28/10/16	TMG-1067-RR	M	D	5,29	27,9	13,00	139	0,58	14.549	4.141	28,5%
4	S	L	28/10/16	BMX-Ícone-RR	M	I	5,29	27,9	13,00	139	0,58	14.549	4.609	31,7%
4	S	L	28/10/16	BMX-Power-RR	M	I	5,29	27,9	13,00	139	0,58	14.549	3.891	26,7%
5	S	P	01/12/17	BMX-Ativa-RR	P	D	5,29	27,9	12,77	127	0,53	12.589	4.213	33,5%

^(a) Ciclo precoce (P) e médio (M). ^(b) Hábito de crescimento determinado (D) e indeterminado (I). ^(c) índice de área foliar máximo igual ao índice de área foliar máximo ótimo. ^(d) Temperatura do ar igual à temperatura ótima da cultura de soja durante todo ciclo. ^(e) Insolação igual ao fotoperíodo durante todo ciclo.

4.1.3 Eficiência agrícola

Os valores de eficiência agrícola referentes aos diferentes ambientes de produção estão apresentados na Tabela 20. Tais valores são estimados onde foram conduzidos os experimentos sob irrigação e de sequeiro onde os valores de produtividade obtenível e real foram determinados experimentalmente fixando o cultivar, o que a princípio, cada um isoladamente representa a espécie *Glycine max* (soja).

A rigor, este valor só poderia ser calculado no ambiente de produção 5, onde o genótipo e os elementos do clima são os mesmos. Nos demais casos, optou-se por estimar a eficiência agrícola fixando o genótipo, o que ocorreu nos ambientes de produção (1 e 2) e (3 e 4), porém os elementos do clima são diferentes, bem como as demais variáveis, desde o controle fitossanitário às demais ações de manejo.

Em média, a eficiência agrícola foi de 85,8%. Verifica-se valores de eficiência agrícola inferiores à média nos ambientes de produção 3 e 4 e no 5. O ambiente de produção 5 foi o que apresentou menor eficiência agrícola.

Tabela 20 - Valores estimados de eficiência agrícola (E_A , kg kg^{-1}) em função da produtividade obtível (P_i , kg ha^{-1}), produtividade real (P_R , kg ha^{-1}), índice de área foliar máximo (IAFx, $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$), temperatura do ar (T , $^{\circ}\text{C}$), insolação (n , h d^{-1}), duração do ciclo (DC, d) e índice de colheita (IC, kg kg^{-1}). Sistemas de produção (SP): irrigado (I) e sequeiro (S). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, SP (I) e Fazenda Cabeceira do Taquari, Leme, SP (S). Safra 2016/2017.

AP	SP	L	Semeadura	Cultivar	C ^(a)	HC ^(b)	N ^(c)	DC	IC	P _i	P _R	E _A
1/2	I/S	P/L	22/28/10/16	TMG-7161-RR	P	I	13,11/13,06	123/127	0,53	4.134	3.873	93,7%
3/4	I/S	P/L	22/28/10/16	BMX-Potência-R	M	I	13,05/13,00	140/139	0,58	4.771	4.089	85,7%
3/4	I/S	P/L	22/28/10/16	TMG-1067-RR	M	D	13,05/13,00	140/139	0,58	5.052	4.141	82,0%
3/4	I/S	P/L	22/28/10/16	BMX-Ícone-RR	M	I	13,05/13,00	140/139	0,58	5.003	4.609	92,1%
3/4	I/S	P/L	22/28/10/16	BMX-Power-RR	M	I	13,05/13,00	140/139	0,58	4.663	3.891	83,4%
5	I/S	P	01/12/17	BMX-Ativa-RR	P	D	12,77	127	0,53	5.400	4.213	78,0%

^(a) Ciclo precoce (P) e médio (M). ^(b) Hábito de crescimento determinado (D) e indeterminado (I): índice de área foliar máximo igual ao índice de área foliar máximo ótimo ($5,29 \text{ m}^2 \text{m}^{-2}$), e temperatura do ar igual à temperatura ótima ($27,9^{\circ}\text{C}$) da cultura de soja durante todo ciclo. ^(c) Insolação igual ao fotoperíodo durante todo ciclo.

4.1.4 Eficiência do uso de fotoperíodo

Os valores de eficiência do uso de fotoperíodo (E_F) (Tabela 21) se referem à perda relativa de produtividade potencial devido à nebulosidade, ou seja, devido à insolação ser inferior ao fotoperíodo.

As Tabelas 22, 23, 24, 25 e 26 se referem à perda relativa de produtividade potencial devido à nebulosidade nos 5 ambientes de produção.

Tabela 21 - Valores estimados de eficiência do uso de fotoperíodo (E_F , kg kg^{-1}) em função da produtividade potencial (P_D , kg ha^{-1}), produtividade potencial deplecionada pela insolação (P_{Pn} , kg ha^{-1}), índice de área foliar máximo (IAFx, $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$), temperatura do ar (T , $^{\circ}\text{C}$), insolação (n , h d^{-1}), duração do ciclo (DC, d) e índice de colheita (IC, kg kg^{-1}). Sistemas de produção (SP): irrigado (I) e sequeiro (S). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, SP (I) e Fazenda Cabeceira do Taquari, Leme, SP (S). Safras 2016/2017 e 2017/2018.

AP	SP	L	Semeadura	Cultivar	C ^(a)	HC ^(b)	IAFo ^(c)	To ^(d)	N ^(e)	DC	IC	P _P	P _{Pn}	E _F
1	I	P	22/10/16	TMG-7161-RR	P	I	5,29	27,9	13,11	123	0,53	12.654	12.344	97,6%
2	S	L	28/10/16	TMG-7161-RR	P	I	5,29	27,9	13,06	127	0,53	13.012	12.695	97,6%
3	I	P	22/10/16	BMX-Potência-RR	M	I	5,29	27,9	13,05	140	0,58	15.627	15.226	97,4%
3	I	P	22/10/16	TMG-1067-RR	M	D	5,29	27,9	13,05	140	0,58	15.627	15.226	97,4%
3	I	P	22/10/16	BMX-Ícone-RR	M	I	5,29	27,9	13,05	140	0,58	15.627	15.226	97,4%
3	I	P	22/10/16	BMX-Power-RR	M	I	5,29	27,9	13,05	140	0,58	15.627	15.226	97,4%
4	S	L	28/10/16	BMX-Potência-RR	M	I	5,29	27,9	13,00	139	0,58	14.549	14.188	97,5%
4	S	L	28/10/16	TMG-1067-RR	M	D	5,29	27,9	13,00	139	0,58	14.549	14.188	97,5%
4	S	L	28/10/16	BMX-Ícone-RR	M	I	5,29	27,9	13,00	139	0,58	14.549	14.188	97,5%
4	S	L	28/10/16	BMX-Power-RR	M	I	5,29	27,9	13,00	139	0,58	14.549	14.188	97,5%
5	I/S	P	01/12/17	BMX-Ativa-RR	P	D	5,29	27,9	12,77	127	0,53	12.589	9.462	75,2%

^(a) Ciclo precoce (P) e médio (M). ^(b) Hábito de crescimento determinado (D) e indeterminado (I). ^(c) índice de área foliar máximo igual ao índice de área foliar máximo ótimo. ^(d) Temperatura do ar igual à temperatura ótima da cultura de soja durante todo ciclo. ^(e) Insolação igual ao fotoperíodo durante todo ciclo.

Tabela 22 - Produtividade potencial deplecionada pela insolação (P_n , kg ha⁻¹) da cultura de soja em função do fotoperíodo (N , h d⁻¹), insolação (n , h d⁻¹) (igual ao fotoperíodo), temperatura (T , °C) (igual à temperatura ótima da cultura de soja), índice de área foliar máximo ($IAFx$, m² m⁻²) (igual ao índice de área foliar máximo ótimo) e duração do ciclo (DC, d). Ambiente de produção I. Cultivar TMG-7161-RR. Safra 2016/2017. Piracicaba, SP (Latitude: -22,725°).

Dec	Data	i	N	Qo	T	n	CTc	CTn	PPBc	PPBn	PPBp	CR	Δt	PPBp.CR.Δt
S	18/10/2016	292												
1	22/10/2016	296												
2	01/11/2016	301	12,82	40,06	27,9	12,57	1,45	1,18	644,47	5,62	650,08	0,50	10	3250
3	11/11/2016	311	13,00	40,99	27,9	12,72	1,45	1,18	654,58	6,33	660,91	0,50	10	3305
4	21/11/2016	321	13,16	41,71	27,9	12,76	1,45	1,18	657,40	9,04	666,44	0,50	10	3332
5	01/12/2016	331	13,28	42,23	27,9	12,63	1,45	1,18	651,11	14,65	665,75	0,50	10	3329
6	11/12/2016	341	13,36	42,57	27,9	12,89	1,45	1,18	664,84	10,52	675,36	0,50	10	3377
7	21/12/2016	351	13,39	42,75	27,9	12,93	1,45	1,18	667,07	10,49	677,56	0,50	10	3388
8	31/12/2016	361	13,38	42,75	27,9	12,59	1,45	1,18	650,01	17,99	668,00	0,50	10	3340
9	10/01/2017	5	13,33	42,62	27,9	12,58	1,45	1,18	650,54	17,01	667,56	0,50	10	3338
10	20/01/2017	15	13,24	42,30	27,9	12,63	1,45	1,18	653,77	13,85	667,62	0,50	10	3338
11	30/01/2017	25	13,11	41,78	27,9	12,25	1,45	1,18	634,82	19,28	654,10	0,50	10	3271
12	09/02/2017	35	12,94	41,05	27,9	12,45	1,45	1,18	644,12	11,21	655,33	0,50	10	3277
13	19/02/2017	45	12,76	40,09	27,9	12,16	1,45	1,18	626,91	13,40	640,31	0,50	10	3202
14	22/02/2017	48	12,70	39,75	27,9	11,41	1,45	1,18	587,28	28,74	616,02	0,50	3	924
C	22/02/2017	48	13,11	41,59	27,9	12,50		DC	P_n	$IAFx$	$CIaF$	IC	u	40669
			1613	5115		1538		123	12344	5,29	0,50	0,53	0,13	

Tabela 23 - Produtividade potencial deplecionada pela insolação (P_m , kg ha⁻¹) da cultura de soja em função do fotoperíodo (N, h d⁻¹), insolação (n, h d⁻¹) (igual ao fotoperíodo), temperatura (T, °C) (igual à temperatura ótima da cultura de soja), índice de área foliar máximo (IAFx, m² m⁻²) (igual ao índice de área foliar máximo ótimo) e duração do ciclo (DC, d). Ambiente de produção 2. Cultivar TMG-7161-RR. Safra 2016/2017. Leme, SP (Latitude: -22,1892°).

Dec	Data	i	N	Qo	T	n	CTc	CTn	PPBc	PPBn	PPBp	CR	Δt	PPBp.CR.Δt
S	18/10/2016	292												
1	28/10/2016	302												
2	07/11/2016	307	12,91	40,62	27,9	12,62	1,45	1,18	648,45	6,95	655,40	0,50	10	3277
3	17/11/2016	317	13,07	41,39	27,9	12,90	1,45	1,18	663,44	4,66	668,10	0,50	10	3341
4	27/11/2016	327	13,20	41,97	27,9	12,90	1,45	1,18	656,04	11,04	667,08	0,50	10	3335
5	07/12/2016	337	13,30	42,36	27,9	13,01	1,45	1,18	657,01	12,77	669,78	0,50	10	3349
6	17/12/2016	347	13,35	42,59	27,9	12,28	1,45	1,18	662,23	11,75	673,98	0,50	10	3370
7	27/12/2016	357	13,36	42,66	27,9	12,53	1,45	1,18	674,70	6,70	681,40	0,50	10	3407
8	06/01/2017	1	13,32	42,59	27,9	12,29	1,45	1,18	644,15	19,66	663,82	0,50	10	3319
9	16/01/2017	11	13,25	42,36	27,9	12,51	1,45	1,18	644,39	18,28	662,67	0,50	10	3313
10	26/01/2017	21	13,13	41,95	27,9	12,13	1,45	1,18	643,68	16,32	659,99	0,50	10	3300
11	05/02/2017	31	12,99	41,33	27,9	11,67	1,45	1,18	646,98	11,49	658,48	0,50	10	3292
12	15/02/2017	41	12,81	40,49	27,9	11,58	1,45	1,18	637,42	11,06	648,48	0,50	10	3242
13	25/02/2017	51	12,62	39,42	27,9	10,65	1,45	1,18	595,43	23,39	618,82	0,50	10	3094
14	04/03/2017	58	12,48	38,52	27,9	9,84	1,45	1,18	613,93	10,49	624,43	0,50	7	2186
C	04/03/2017	58	13,06	41,40	27,9	12,07		DC	P_m	IAFx	CIaF	IC	u	41825
			1659	5258		1533		127	12695	5,29	0,50	0,53	0,13	

Tabela 24 - Produtividade potencial deplecionada pela insolação (P_m , kg ha⁻¹) da cultura de soja em função do fotoperíodo (N, h d⁻¹), insolação (n, h d⁻¹) (igual ao fotoperíodo), temperatura (T, °C) (igual à temperatura ótima da cultura de soja), índice de área foliar máximo (IAFx, m² m⁻²) (igual ao índice de área foliar máximo ótimo) e duração do ciclo (DC, d). Ambiente de produção 3. Cultivares BMX-Potência-RR, TMG-1067-RR, BMX-Ícone-RR e BMX-Power-RR. Safra 2016/2017. Piracicaba, SP (Latitude: -22,725°).

Dec	Data	i	N	Qo	T	n	CTc	CTn	PPBc	PPBn	PPBp	CR	Δt	PPBp.CR.Δt
S	18/10/2016	292												
1	22/10/2016	296	12,82	40,06	27,9	12,57	1,45	1,18	644,47	5,62	650,08	0,50	10	3250
2	01/11/2016	301	13,00	40,99	27,9	12,72	1,45	1,18	654,58	6,33	660,91	0,50	10	3305
3	11/11/2016	311	13,16	41,71	27,9	12,76	1,45	1,18	657,40	9,04	666,44	0,50	10	3332
4	21/11/2016	321	13,28	42,23	27,9	12,63	1,45	1,18	651,11	14,65	665,75	0,50	10	3329
5	01/12/2016	331	13,36	42,57	27,9	12,89	1,45	1,18	664,84	10,52	675,36	0,50	10	3377
6	11/12/2016	341	13,39	42,75	27,9	12,93	1,45	1,18	667,07	10,49	677,56	0,50	10	3388
7	21/12/2016	351	13,38	42,75	27,9	12,59	1,45	1,18	650,01	17,99	668,00	0,50	10	3340
8	31/12/2016	361	13,33	42,62	27,9	12,58	1,45	1,18	650,54	17,01	667,56	0,50	10	3338
9	10/01/2017	5	13,24	42,30	27,9	12,63	1,45	1,18	653,77	13,85	667,62	0,50	10	3338
10	20/01/2017	15	13,11	41,78	27,9	12,25	1,45	1,18	634,82	19,28	654,10	0,50	10	3271
11	30/01/2017	25	12,94	41,05	27,9	12,45	1,45	1,18	644,12	11,21	655,33	0,50	10	3277
12	09/02/2017	35	12,76	40,09	27,9	12,16	1,45	1,18	626,91	13,40	640,31	0,50	10	3202
13	19/02/2017	45	12,55	38,88	27,9	11,65	1,45	1,18	596,52	19,96	616,48	0,50	10	3082
14	01/03/2017	55	12,34	37,44	27,9	11,56	1,45	1,18	585,40	16,90	602,30	0,50	10	3011
15	11/03/2017	65	13,05	41,23	27,9	12,45		DC	P _m	IAFx	CIAF	IC	u	45839
C	11/03/2017	65	1827	5772	27,9	1744		140	15226	5,29	0,50	0,58	0,13	

Tabela 25 - Produtividade potencial deplecionada pela insolação (P_m , kg ha⁻¹) da cultura de soja em função do fotoperíodo (N, h d⁻¹), insolação (n, h d⁻¹) (igual ao fotoperíodo), temperatura (T, °C) (igual à temperatura ótima da cultura de soja), índice de área foliar máximo (IAFx, m² m⁻²) (igual ao índice de área foliar máximo ótimo) e duração do ciclo (DC, d). Ambiente de produção 4. Cultivares BMX-Potência-RR, TMG-1067-RR, BMX-Ícone-RR e BMX-Power-RR. Safra 2016/2017. Leme, SP (Latitude: -22,1892°).

Dec	Data	i	N	Qo	T	n	CTc	CTn	PPBc	PPBn	PPBp	CR	Δt	PPBp.CR.Δt
S	18/10/2016	292												
1	28/10/2016	302												
2	07/11/2016	307	12,91	40,62	27,9	12,6	1,45	1,18	648,45	6,95	655,40	0,50	10	3277
3	17/11/2016	317	13,07	41,39	27,9	12,9	1,45	1,18	663,44	4,66	668,10	0,50	10	3341
4	27/11/2016	327	13,20	41,97	27,9	12,7	1,45	1,18	656,04	11,04	667,08	0,50	10	3335
5	07/12/2016	337	13,30	42,36	27,9	12,7	1,45	1,18	657,01	12,77	669,78	0,50	10	3349
6	17/12/2016	347	13,35	42,59	27,9	12,8	1,45	1,18	662,23	11,75	673,98	0,50	10	3370
7	27/12/2016	357	13,36	42,66	27,9	13,1	1,45	1,18	674,70	6,70	681,40	0,50	10	3407
8	06/01/2017	1	13,32	42,59	27,9	12,5	1,45	1,18	644,15	19,66	663,82	0,50	10	3319
9	16/01/2017	11	13,25	42,36	27,9	12,4	1,45	1,18	644,39	18,28	662,67	0,50	10	3313
10	26/01/2017	21	13,13	41,95	27,9	12,4	1,45	1,18	643,68	16,32	659,99	0,50	10	3300
11	05/02/2017	31	12,99	41,33	27,9	12,5	1,45	1,18	646,98	11,49	658,48	0,50	10	3292
12	15/02/2017	41	12,81	40,49	27,9	12,3	1,45	1,18	637,42	11,06	648,48	0,50	10	3242
13	25/02/2017	51	12,62	39,42	27,9	11,6	1,45	1,18	595,43	23,39	618,82	0,50	10	3094
14	07/03/2017	61	12,41	38,11	27,9	11,8	1,45	1,18	601,89	13,42	615,31	0,50	10	3077
15	16/03/2017	70	12,22	36,74	27,9	11,8	1,45	1,18	595,59	8,71	604,29	0,50	9	2719
C	16/03/2017	70	13,00	41,04	27,9	12,43		DC	P _m	IAFx	CIaF	IC	u	42717
			1806	5705		1728		139	14188	5,29	0,50	0,58	0,13	

Tabela 26 - Produtividade potencial deplecionada pela insolação (P_m , kg ha⁻¹) da cultura de soja em função do fotoperíodo (N, h d⁻¹), insolação (n, h d⁻¹) (igual ao fotoperíodo), temperatura (T, °C) (igual à temperatura ótima da cultura de soja), índice de área foliar máximo (IAFx, m² m⁻²) (igual ao índice de área foliar máximo ótimo) e duração do ciclo (DC, d). Ambiente de produção 5. Cultivar BMX-Ativa-RR. Safra 2017/2018, Piracicaba, SP (Latitude: -22,725°).

Dec	Data	i	N	Qo	T	n	CTc	CTn	PPBc	PPBn	PPBp	CR	Δt	PPBp.CR.Δt
S	18/10/2016	292												
1	01/12/2017	335												
2	11/12/2017	340	13,35	42,55	27,9	9,00	1,45	1,18	464,17	98,00	562,17	0,50	10	2811
3	21/12/2017	350	13,39	42,74	27,9	4,77	1,45	1,18	246,10	194,34	440,44	0,50	10	2202
4	31/12/2017	360	13,39	42,76	27,9	4,59	1,45	1,18	237,02	198,45	435,48	0,50	10	2177
5	10/01/2018	5	13,33	42,62	27,9	5,63	1,45	1,18	291,11	173,99	465,11	0,50	10	2326
6	20/01/2018	15	13,24	42,30	27,9	7,20	1,45	1,18	372,79	136,47	509,26	0,50	10	2546
7	30/01/2018	25	13,11	41,78	27,9	8,44	1,45	1,18	437,25	105,39	542,64	0,50	10	2713
8	09/02/2018	35	12,94	41,05	27,9	4,95	1,45	1,18	256,17	179,99	436,16	0,50	10	2181
9	19/02/2018	45	12,76	40,09	27,9	6,91	1,45	1,18	356,30	130,84	487,14	0,50	10	2436
10	01/03/2018	55	12,55	38,88	27,9	8,72	1,45	1,18	446,46	84,87	531,33	0,50	10	2657
11	11/03/2018	65	12,34	37,44	27,9	8,68	1,45	1,18	439,52	79,74	519,26	0,50	10	2596
12	21/03/2018	75	12,11	35,79	27,9	7,71	1,45	1,18	384,46	94,10	478,55	0,50	10	2393
13	31/03/2018	85	11,89	33,98	27,9	8,12	1,45	1,18	397,26	78,44	475,69	0,50	10	2378
14	10/04/2018	95	11,66	32,08	27,9	10,32	1,45	1,18	493,33	27,16	520,49	0,50	7	1822
C	10/04/2018	95	12,77	39,54	27,9	7,31		DC	P_m	IAFx	CIAF	IC	u	31238
			1622	5022		929		127	9481	5,29	0,50	0,53	0,13	

4.1.5 Eficiência de otimização de temperatura

Os valores de eficiência de otimização de temperatura (E_T) (Tabela 27) se referem à perda relativa de produtividade potencial devido à temperatura do ar diferir da temperatura ótima da cultura de soja, ou seja, devido à temperatura do ambiente de produção ser inferior ou superior à temperatura ótima de 27,9°C.

As Tabelas 28, 29, 30, 31 e 32 se referem à perda relativa de produtividade potencial devido à temperatura do ar diferir da temperatura ótima da cultura de soja nos 5 ambientes de produção.

Tabela 27 - Valores estimados de eficiência de otimização de temperatura (E_T , kg kg⁻¹) em função da produtividade potencial (P_p , kg ha⁻¹), produtividade potencial deplecionada pela temperatura (P_{PT} , kg ha⁻¹), índice de área foliar máximo (IAFx, m² m⁻²), temperatura do ar (T, °C), insolação (n, h d⁻¹), duração do ciclo (DC, d) e índice de colheita (IC, kg kg⁻¹). Sistemas de produção (SP): irrigado (I) e sequeiro (S). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, SP (I) e Fazenda Cabeceira do Taquari, Leme, SP (S). Safras 2016/2017 e 2017/2018.

AP	SP	L	Semeadura	Cultivar	C ^(a)	HC ^(b)	IAFo ^(c)	To ^(d)	N ^(e)	DC	IC	P _p	P _{PT}	E _T
1	I	P	22/10/16	TMG-7161-RR	P	I	5,29	27,9	13,11	123	0,53	12.654	11.903	94,1%
2	S	L	28/10/16	TMG-7161-RR	P	I	5,29	27,9	13,06	127	0,53	13.012	12.283	94,4%
3	I	P	22/10/16	BMX-Potência-RR	M	I	5,29	27,9	13,05	140	0,58	15.627	14.718	94,2%
3	I	P	22/10/16	TMG-1067-RR	M	D	5,29	27,9	13,05	140	0,58	15.627	14.718	94,2%
3	I	P	22/10/16	BMX-Ícone-RR	M	I	5,29	27,9	13,05	140	0,58	15.627	14.718	94,2%
3	I	P	22/10/16	BMX-Power-RR	M	I	5,29	27,9	13,05	140	0,58	15.627	14.718	94,2%
4	S	L	28/10/16	BMX-Potência-RR	M	I	5,29	27,9	13,00	139	0,58	14.549	13.735	94,4%
4	S	L	28/10/16	TMG-1067-RR	M	D	5,29	27,9	13,00	139	0,58	14.549	13.735	94,4%
4	S	L	28/10/16	BMX-Ícone-RR	M	I	5,29	27,9	13,00	139	0,58	14.549	13.735	94,4%
4	S	L	28/10/16	BMX-Power-RR	M	I	5,29	27,9	13,00	139	0,58	14.549	13.735	94,4%
5	I/S	P	01/12/17	BMX-Ativa-RR	P	D	5,29	27,9	12,77	127	0,53	12.589	12.131	96,4%

^(a) Ciclo precoce (P) e médio (M). ^(b) Hábito de crescimento determinado (D) e indeterminado (I). ^(c) índice de área foliar máximo igual ao índice de área foliar máximo ótimo. ^(d) Temperatura do ar igual à temperatura ótima da cultura de soja durante todo ciclo. ^(e) Insolação igual ao fotoperíodo durante todo ciclo.

Tabela 28 - Produtividade potencial deplecionada pela temperatura (P_{Pr} , kg ha⁻¹) da cultura de soja em função do fotoperíodo (N, h d⁻¹), insolação (n, h d⁻¹) (igual ao fotoperíodo), temperatura (T , °C), índice de área foliar máximo (IAF_x, m² m⁻²) (igual ao índice de área foliar máximo ótimo) e duração do ciclo (DC, d). Ambiente de produção 1. Cultivar TMG-7161-RR. Safra 2016/2017. Piracicaba, SP (Latitude: -22,725°).

Dec	Data	i	N	Qo	T	n	CTc	CTn	PPBc	PPBn	PPBp	CR	Δt	PPBp.CR.Δt
S	18/10/2016	292												
1	22/10/2016	296												
2	01/11/2016	301	12,82	40,06	22,5	12,82	1,34	1,13	604,16	0,00	604,16	0,50	10	3021
3	11/11/2016	311	13,00	40,99	20,9	13,00	1,27	1,11	581,84	0,00	581,84	0,50	10	2909
4	21/11/2016	321	13,16	41,71	23,3	13,16	1,37	1,15	636,97	0,00	636,97	0,50	10	3185
5	01/12/2016	331	13,28	42,23	23,4	13,28	1,37	1,15	644,61	0,00	644,61	0,50	10	3223
6	11/12/2016	341	13,36	42,57	22,8	13,36	1,35	1,14	639,33	0,00	639,33	0,50	10	3197
7	21/12/2016	351	13,39	42,75	24,8	13,39	1,41	1,17	671,26	0,00	671,26	0,50	10	3356
8	31/12/2016	361	13,38	42,75	24,9	13,38	1,42	1,17	672,68	0,00	672,68	0,50	10	3363
9	10/01/2017	5	13,33	42,62	22,9	13,33	1,35	1,14	640,95	0,00	640,95	0,50	10	3205
10	20/01/2017	15	13,24	42,30	22,7	13,24	1,35	1,14	633,94	0,00	633,94	0,50	10	3170
11	30/01/2017	25	13,11	41,78	23,5	13,11	1,38	1,15	642,08	0,00	642,08	0,50	10	3210
12	09/02/2017	35	12,94	41,05	25,4	12,94	1,43	1,17	657,61	0,00	657,61	0,50	10	3288
13	19/02/2017	45	12,76	40,09	24,6	12,76	1,41	1,16	637,02	0,00	637,02	0,50	10	3185
14	22/02/2017	48	12,70	39,75	22,6	12,70	1,34	1,14	602,25	0,00	602,2545069	0,50	3	903
C	22/02/2017	48	13,11	41,59	23,4	13,11		DC	P_{Pr}	IAF _x	CIAF	IC	n	39216
			1613	5115		1613		123	11903	5,29	0,50	0,53	0,13	

Tabela 29 - Produtividade potencial deplecionada pela temperatura (P_{Pr} , kg ha⁻¹) da cultura de soja em função do fotoperíodo (N, h d⁻¹), insolação (n, h d⁻¹) (igual ao fotoperíodo), temperatura (T, °C), índice de área foliar máximo (IAFx, m² m⁻²) (igual ao índice de área foliar máximo ótimo) e duração do ciclo (DC, d). Ambiente de produção 2. Cultivar TMG-7161-RR. Safra 2016/2017. Leme, SP (Latitude: -22,1892°).

Dec	Data	i	N	Qo	T	n	CTc	CTn	PPBc	PPBn	PPBp	CR	Δt	PPBp.CR.Δt
S	18/10/2016	292												
1	28/10/2016	302												
2	07/11/2016	307	12,91	40,62	22,3	12,91	1,33	1,13	607,03	0,00	607,03	0,50	10	3035
3	17/11/2016	317	13,07	41,39	22,2	13,07	1,32	1,13	612,76	0,00	612,76	0,50	10	3064
4	27/11/2016	327	13,20	41,97	23,1	13,20	1,36	1,14	637,42	0,00	637,42	0,50	10	3187
5	07/12/2016	337	13,30	42,36	23,3	13,30	1,37	1,15	644,77	0,00	644,77	0,50	10	3224
6	17/12/2016	347	13,35	42,59	23,5	13,35	1,37	1,15	650,79	0,00	650,79	0,50	10	3254
7	27/12/2016	357	13,36	42,66	25,3	13,36	1,43	1,17	676,39	0,00	676,39	0,50	10	3382
8	06/01/2017	1	13,32	42,59	24,0	13,32	1,39	1,16	658,78	0,00	658,78	0,50	10	3294
9	16/01/2017	11	13,25	42,36	22,0	13,25	1,31	1,13	619,69	0,00	619,69	0,50	10	3098
10	26/01/2017	21	13,13	41,95	23,3	13,13	1,37	1,15	639,23	0,00	639,23	0,50	10	3196
11	05/02/2017	31	12,99	41,33	24,8	12,99	1,41	1,17	654,66	0,00	654,66	0,50	10	3273
12	15/02/2017	41	12,81	40,49	25,9	12,81	1,44	1,18	654,95	0,00	654,95	0,50	10	3275
13	25/02/2017	51	12,62	39,42	22,8	12,62	1,35	1,14	601,61	0,00	601,61	0,50	10	3008
14	04/03/2017	58	12,48	38,52	25,0	12,48	1,42	1,17	621,90	0,00	621,90	0,50	7	2177
C	04/03/2017	58	13,06	41,40	23,7	13,06		DC	P_{Pr}	IAFx	CIaF	IC	u	40467
			1659	5258		1659		127	12283	5,29	0,50	0,53	0,13	

Tabela 30 - Produtividade potencial deplecionada pela temperatura (P_{Pr} , kg ha⁻¹) da cultura de soja em função do fotoperíodo (N, h d⁻¹), insolação (n, h d⁻¹) (igual ao fotoperíodo), temperatura (T, °C), índice de área foliar máximo (IAFx, m² m⁻²) (igual ao índice de área foliar máximo ótimo) e duração do ciclo (DC, d). Ambiente de produção 3. Cultivares BMX-Potência-RR, TMG-1067-RR, BMX-Ícone-RR e BMX-Power-RR. Safra 2016/2017. Piracicaba, SP (Latitude: -22,725°).

Dec	Data	i	N	Qo	T	n	CTc	CTn	PPBc	PPBn	PPBp	CR	Δt	PPBp.CR.Δt
S	18/10/2016	292												
1	22/10/2016	296												
2	01/11/2016	301	12,82	40,06	22,5	12,82	1,34	1,13	604,16	0,00	604,16	0,50	10	3021
3	11/11/2016	311	13,00	40,99	20,9	13,00	1,27	1,11	581,84	0,00	581,84	0,50	10	2909
4	21/11/2016	321	13,16	41,71	23,3	13,16	1,37	1,15	636,97	0,00	636,97	0,50	10	3185
5	01/12/2016	331	13,28	42,23	23,4	13,28	1,37	1,15	644,61	0,00	644,61	0,50	10	3223
6	11/12/2016	341	13,36	42,57	22,8	13,36	1,35	1,14	639,33	0,00	639,33	0,50	10	3197
7	21/12/2016	351	13,39	42,75	24,8	13,39	1,41	1,17	671,26	0,00	671,26	0,50	10	3356
8	31/12/2016	361	13,38	42,75	24,9	13,38	1,42	1,17	672,68	0,00	672,68	0,50	10	3363
9	10/01/2017	5	13,33	42,62	22,9	13,33	1,35	1,14	640,95	0,00	640,95	0,50	10	3205
10	20/01/2017	15	13,24	42,30	22,7	13,24	1,35	1,14	633,94	0,00	633,94	0,50	10	3170
11	30/01/2017	25	13,11	41,78	23,5	13,11	1,38	1,15	642,08	0,00	642,08	0,50	10	3210
12	09/02/2017	35	12,94	41,05	25,4	12,94	1,43	1,17	657,61	0,00	657,61	0,50	10	3288
13	19/02/2017	45	12,76	40,09	24,6	12,76	1,41	1,16	637,02	0,00	637,02	0,50	10	3185
14	01/03/2017	55	12,55	38,88	23,5	12,55	1,37	1,15	606,76	0,00	606,76	0,50	10	3034
15	11/03/2017	65	12,34	37,44	23,7	12,34	1,38	1,15	593,07	0,00	593,07	0,50	10	2965
C	11/03/2017	65	13,05	41,23	23,5	13,05		DC	P_{Pr}	IAFx	CIAP	IC	n	44311
			1827	5772		1827		140	14718	5,29	0,50	0,58	0,13	

Tabela 31 - Produtividade potencial deplecionada pela temperatura (P_{Pr} , kg ha⁻¹) da cultura de soja em função do fotoperíodo (N, h d⁻¹), insolação (n, h d⁻¹) (igual ao fotoperíodo), temperatura (T, °C), índice de área foliar máximo (IAFx, m² m⁻²) (igual ao índice de área foliar máximo ótimo) e duração do ciclo (DC, d). Ambiente de produção 4. Cultivares BMX-Potência-RR, TMG-1067-RR, BMX-Ícone-RR e BMX-Power-RR. Safra 2016/2017. Leme, SP (Latitude: -22,1892°).

Dec	Data	i	N	Qo	T	n	CTc	CTn	PPBc	PPBn	PPBp	CR	Δt	PPBp.CR.Δt
S	18/10/2016	292												
1	28/10/2016	302												
2	07/11/2016	307	12,91	40,62	22,3	12,9	1,33	1,13	607,03	0,00	607,03	0,50	10	3035
3	17/11/2016	317	13,07	41,39	22,2	13,1	1,32	1,13	612,76	0,00	612,76	0,50	10	3064
4	27/11/2016	327	13,20	41,97	23,1	13,2	1,36	1,14	637,42	0,00	637,42	0,50	10	3187
5	07/12/2016	337	13,30	42,36	23,3	13,3	1,37	1,15	644,77	0,00	644,77	0,50	10	3224
6	17/12/2016	347	13,35	42,59	23,5	13,3	1,37	1,15	650,79	0,00	650,79	0,50	10	3254
7	27/12/2016	357	13,36	42,66	25,3	13,4	1,43	1,17	676,39	0,00	676,39	0,50	10	3382
8	06/01/2017	1	13,32	42,59	24,0	13,3	1,39	1,16	658,78	0,00	658,78	0,50	10	3294
9	16/01/2017	11	13,25	42,36	22,0	13,2	1,31	1,13	619,69	0,00	619,69	0,50	10	3098
10	26/01/2017	21	13,13	41,95	23,3	13,1	1,37	1,15	639,23	0,00	639,23	0,50	10	3196
11	05/02/2017	31	12,99	41,33	24,8	13,0	1,41	1,17	654,66	0,00	654,66	0,50	10	3273
12	15/02/2017	41	12,81	40,49	25,9	12,8	1,44	1,18	654,95	0,00	654,95	0,50	10	3275
13	25/02/2017	51	12,62	39,42	22,8	12,6	1,35	1,14	601,61	0,00	601,61	0,50	10	3008
14	07/03/2017	61	12,41	38,11	24,6	12,4	1,41	1,16	612,42	0,00	612,42	0,50	10	3062
15	16/03/2017	70	12,22	36,74	25,0	12,2	1,42	1,17	600,38	0,00	600,38	0,50	9	2702
C	16/03/2017	70	13,00	41,04	23,7	13,00		DC	P_{Pr}	IAFx	CIAF	IC	u	41353
			1806	5705		1806		139	13735	5,29	0,50	0,58	0,13	

Tabela 32 - Produtividade potencial deplecionada pela temperatura (P_{pr} , kg ha⁻¹) da cultura de soja em função do fotoperíodo (N, h d⁻¹), insolação (n, h d⁻¹) (igual ao fotoperíodo), temperatura (T, °C), índice de área foliar máximo (IAFx, m² m⁻²) (igual ao índice de área foliar máximo ótimo) e duração do ciclo (DC, d). Ambiente de produção 5. Cultivar BMX-Ativa-RR. Safra 2017/2018, Piracicaba, SP (Latitude: -22,725°).

Dec	Data	i	N	Qo	T	n	CTc	CTn	PPBc	PPBn	PPBp	CR	Δt	PPBp.CR.Δt
S	18/10/2016	292												
1	01/12/2017	335												
2	11/12/2017	340	13,35	42,55	25,8	13,4	1,44	1,17	679,63	0,00	679,63	0,50	10	3398
3	21/12/2017	350	13,39	42,74	24,6	13,4	1,41	1,16	669,28	0,00	669,28	0,50	10	3346
4	31/12/2017	360	13,39	42,76	23,9	13,4	1,39	1,16	659,43	0,00	659,43	0,50	10	3297
5	10/01/2018	5	13,33	42,62	25,0	13,3	1,42	1,17	671,97	0,00	671,97	0,50	10	3360
6	20/01/2018	15	13,24	42,30	26,3	13,2	1,44	1,18	679,81	0,00	679,81	0,50	10	3399
7	30/01/2018	25	13,11	41,78	23,5	13,1	1,38	1,15	641,76	0,00	641,76	0,50	10	3209
8	09/02/2018	35	12,94	41,05	24,1	12,9	1,40	1,16	642,31	0,00	642,31	0,50	10	3212
9	19/02/2018	45	12,76	40,09	24,5	12,8	1,41	1,16	635,67	0,00	635,67	0,50	10	3178
10	01/03/2018	55	12,55	38,88	25,8	12,6	1,43	1,17	633,66	0,00	633,66	0,50	10	3168
11	11/03/2018	65	12,34	37,44	26,8	12,3	1,45	1,18	622,22	0,00	622,22	0,50	10	3111
12	21/03/2018	75	12,11	35,79	25,0	12,1	1,42	1,17	588,94	0,00	588,94	0,50	10	2945
13	31/03/2018	85	11,89	33,98	23,0	11,9	1,36	1,14	542,39	0,00	542,39	0,50	10	2712
14	10/04/2018	95	11,66	32,08	20,0	11,7	1,22	1,09	466,53	0,00	466,53	0,50	7	1633
C	10/04/2018	95	12,77	39,54	24,5	12,77		DC	P_{pr}	IAFx	ClAF	IC	u	39968
			1622	5022		1622		127	12131	5,29	0,50	0,53	0,13	

4.1.6 Eficiência dos elementos do clima definidores de produtividade potencial

Os valores de eficiência dos elementos do clima definidores de produtividade potencial (E_{EC}) (Tabela 33) se referem à perda relativa de produtividade potencial devido aos efeitos combinados, neste caso, da nebulosidade (efeito caracterizado pela insolação e fotoperíodo) e temperatura do ar (efeito caracterizado pela diferença entre a temperatura do ar e a ótima da cultura de soja).

Tabela 33 - Valores estimados de eficiência dos elementos do clima definidores de produtividade potencial (E_{EC} , kg kg^{-1}) em função da eficiência do uso de dióxido de carbono (E_{CO_2} , kg kg^{-1}), eficiência do uso maximizado de luz (E_L , kg kg^{-1}), eficiência do uso de fotoperíodo (E_F , kg kg^{-1}), eficiência de otimização de temperatura (E_T , kg kg^{-1}), insolação (n , h d^{-1}), duração do ciclo (DC , d) e índice de colheita (IC , kg kg^{-1}). Sistemas de produção (SP): irrigado (I) e sequeiro (S). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, SP (P) e Fazenda Cabeceira do Taquari, Leme, SP (L). Safras 2016/2017 e 2017/2018.

AP	SP	L	Semeadura	Cultivar	C ^(a)	HC ^(b)	N ^(c)	DC	IC	E_{CO_2}	E_L	E_F	E_T	E_{EC}
1	I	P	22/10/16	TMG-7161-RR	P	I	13,11	123	0,53	100%	100%	97,6%	94,1%	97,9%
2	S	L	28/10/16	TMG-7161-RR	P	I	13,06	127	0,53	100%	100%	97,6%	94,4%	98,0%
3	I	P	22/10/16	BMX-Potência-RR	M	I	13,05	140	0,58	100%	100%	97,4%	94,2%	97,9%
3	I	P	22/10/16	TMG-1067-RR	M	D	13,05	140	0,58	100%	100%	97,4%	94,2%	97,9%
3	I	P	22/10/16	BMX-Ícone-RR	M	I	13,05	140	0,58	100%	100%	97,4%	94,2%	97,9%
3	I	P	22/10/16	BMX-Power-RR	M	I	13,05	140	0,58	100%	100%	97,4%	94,2%	97,9%
4	S	L	28/10/16	BMX-Potência-RR	M	I	13,00	139	0,58	100%	100%	97,5%	94,4%	97,9%
4	S	L	28/10/16	TMG-1067-RR	M	D	13,00	139	0,58	100%	100%	97,5%	94,4%	97,9%
4	S	L	28/10/16	BMX-Ícone-RR	M	I	13,00	139	0,58	100%	100%	97,5%	94,4%	97,9%
4	S	L	28/10/16	BMX-Power-RR	M	I	13,00	139	0,58	100%	100%	97,5%	94,4%	97,9%
5	I/S	P	01/12/17	BMX-Ativa-RR	P	D	12,77	127	0,53	100%	100%	75,2%	96,4%	92,3%

^(a) Ciclo precoce (P) e médio (M). ^(b) Hábito de crescimento determinado (D) e indeterminado (I): índice de área foliar máximo igual ao índice de área foliar máximo ótimo ($5,29 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$) e temperatura do ar igual à temperatura ótima ($27,9^\circ\text{C}$) da cultura de soja durante todo ciclo. ^(c) Insolação igual ao fotoperíodo durante todo ciclo.

4.2 Experimentos de campo

4.2.1 Eficiência edáfica

Os valores de eficiência edáfica referentes aos Experimentos I e II (Piracicaba-SP. Safra 2017/2018) estão apresentados na Tabela 34 (valores correspondentes aos quatro cultivares).

Tabela 34 - Valores de eficiência edáfica (E_e) referentes aos experimentos I (sistema de produção: irrigado) e II (sistema de produção: sequeiro). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Safra 2017/2018. Piracicaba, SP.

Experimento	Cultivares	E_e	Experimento	Cultivares	E_e
I	1, 2, 3 e 4	0,95	II	1, 2, 3 e 4	0,83

Cultivar 1: BMX-Ativa-RR. Ciclo precoce com hábito de crescimento determinado.

Cultivar 2: BMX-Lança-RR. Ciclo precoce com hábito de crescimento indeterminado.

Cultivar 3: BRS-GO-7460-RR. Ciclo médio com hábito de crescimento determinado.

Cultivar 4: BMX-Desafio-RR. Ciclo médio com hábito de crescimento indeterminado.

4.2.2 Índice de suficiência hídrica

Os valores do índice de suficiência hídrica referentes aos Experimentos I e II (Piracicaba-SP. Safra 2017/2018) estão apresentados na Tabela 35 (valores correspondentes aos quatro cultivares).

Tabela 35 - Valores do índice de suficiência hídrica (I_w) referentes aos experimentos I (sistema de produção: irrigado) e II (sistema de produção: sequeiro). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Safra 2017/2018. Piracicaba, SP.

Experimento	Cultivares	I_w	Experimento	Cultivares	I_w
I	1, 2, 3 e 4	1,00	II	1, 2, 3 e 4	0,98

Cultivar 1: BMX-Ativa-RR. Ciclo precoce com hábito de crescimento determinado.

Cultivar 2: BMX-Lança-RR. Ciclo precoce com hábito de crescimento indeterminado.

Cultivar 3: BRS-GO-7460-RR. Ciclo médio com hábito de crescimento determinado.

Cultivar 4: BMX-Desafio-RR. Ciclo médio com hábito de crescimento indeterminado.

4.2.3 Índice de suficiência de nutrientes minerais

Os valores de índice de suficiência de nutrientes minerais referentes aos Experimentos I e II (Piracicaba-SP. Safra 2017/2018) estão apresentados na Tabela 36 (valores correspondentes aos quatro cultivares).

Tabela 36 - Valores dos índices de suficiência de nutrientes minerais (I_N) referentes aos experimentos I (sistema de produção: irrigado) e II (sistema de produção: sequeiro). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Safra 2017/2018. Piracicaba, SP.

Experimento	Cultivares	I_N	Experimento	Cultivares	I_N
I	1, 2, 3 e 4	0,90	II	1, 2, 3 e 4	0,70

Cultivar 1: BMX-Ativa-RR. Ciclo precoce com hábito de crescimento determinado.

Cultivar 2: BMX-Lança-RR. Ciclo precoce com hábito de crescimento indeterminado.

Cultivar 3: BRS-GO-7460-RR. Ciclo médio com hábito de crescimento determinado.

Cultivar 4: BMX-Desafio-RR. Ciclo médio com hábito de crescimento indeterminado.

4.2.4 Eficiência de manejo agrícola

Os valores de eficiência de manejo agrícola referentes aos Experimentos I e II (Piracicaba-SP. Safra 2017/2018) estão apresentados na Tabela 37 (valores correspondentes aos quatro cultivares).

Tabela 37 - Valores de eficiência de manejo agrícola (E_M) referentes aos experimentos I (sistema de produção: irrigado) e II (sistema de produção: sequeiro). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Safra 2017/2018. Piracicaba, SP.

Semeadura	Colheita	Genótipo	Ciclo	GMR	E_M
01/12/2017	07/04/2018	BMX-Ativa-RR	Precoce	5,6	0,921
01/12/2017	24/03/2018	BMX-Lança-RR	Precoce	5,8	1,056
01/12/2017	22/04/2018	BRS-GO-7460-RR	Médio	7,4	1,120
01/12/2017	22/04/2018	BMX-Desafio-RR	Médio	7,4	1,166
Média	-	-			1,066

¹ BMX-Ativa-RR. Hábito de crescimento determinado.

² BMX-Lança-RR. Hábito de crescimento indeterminado.

³ BRS-GO-7460-RR. Hábito de crescimento determinado.

⁴ BMX-Desafio-RR. Hábito de crescimento indeterminado.

4.2.5 Produtividade obtenível

Os valores de produtividade obtenível referentes aos Experimentos I e II (Piracicaba-SP. Safra 2017/2018) estão apresentados na Tabela 38 (valores correspondentes aos quatro cultivares).

Tabela 38 - Valores de produtividade obtenível (P_i , kg ha⁻¹). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Experimento I (sistema de produção: irrigado). Safra 2017/2018. Piracicaba, SP.

Semeadura	Colheita	Genótipo	Ciclo	GMR	P_i
01/12/2017	07/04/2018	BMX-Ativa-RR	Precoce	5,6	5400,12 a*
01/12/2017	24/03/2018	BMX-Lança-RR	Precoce	5,8	4782,17 ab
01/12/2017	22/04/2018	BRS-GO-7460-RR	Médio	7,4	4416,53 b
01/12/2017	22/04/2018	BMX-Desafio-RR	Médio	7,4	4455,51 b
Média	-	-			4763,59
CV (%) ²	-	-			8,14

* Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 10% de probabilidade.

¹ BMX-Ativa-RR. Ciclo precoce com hábito de crescimento determinado.

² BMX-Lança-RR. Ciclo precoce com hábito de crescimento indeterminado.

³ BRS-GO-7460-RR. Ciclo médio com hábito de crescimento determinado.

⁴ BMX-Desafio-RR. Ciclo médio com hábito de crescimento indeterminado.

⁵ CV: Coeficiente de variação (%).

4.2.6 Produtividade real

Os valores de produtividade real referentes aos Experimentos I e II (Piracicaba-SP. Safra 2017/2018) estão apresentados na Tabela 39 (valores correspondentes aos quatro cultivares).

Tabela 39 - Valores de produtividade real (P_R , kg ha⁻¹). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Experimento II (sistema de produção: sequeiro). Safra 2017/2018. Piracicaba, SP.

Semeadura	Colheita	Genótipo	Ciclo	GMR	P_R
01/12/2017	07/04/2018	BMX-Ativa-RR	Precoce	5,6	4213,07 c*
01/12/2017	24/03/2018	BMX-Lança-RR	Precoce	5,8	5624,34 bc
01/12/2017	22/04/2018	BRS-GO-7460-RR	Médio	7,4	6211,18 ab
01/12/2017	22/04/2018	BMX-Desafio-RR	Médio	7,4	7063,75 a
Média	-	-			5778,09
C.V.(%) ²	-	-			15,24

* Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 10% de probabilidade.

¹ BMX-Ativa-RR. Ciclo precoce com hábito de crescimento determinado.

² BMX-Lança-RR. Ciclo precoce com hábito de crescimento indeterminado.

³ BRS-GO-7460-RR. Ciclo médio com hábito de crescimento determinado.

⁴ BMX-Desafio-RR. Ciclo médio com hábito de crescimento indeterminado.

⁵ CV: Coeficiente de variação (%).

4.3 Avaliação do genótipo

4.3.1 Temperatura mínima e máxima

Os valores de temperatura mínima e máxima referentes à safra 2017/2018, em Piracicaba-SP, estão apresentados nas Tabela 40.

Tabela 40 - Valores de temperatura mínima (Tn, °C) e máxima (Tx, °C). Piracicaba-SP. Posto agrometeorológico. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Safra 2017/2018.

Data	i	Tn	Tx	Data	i	Tn	Tx	Data	i	Tn	Tx
01/12/2017	0	17,7	27,8	20/01/2018	50	20,1	32,1	11/03/2018	100	19,0	32,1
02/12/2017	1	18,5	28,7	21/01/2018	51	20,1	33,9	12/03/2018	101	19,6	33,5
03/12/2017	2	19,4	31,3	22/01/2018	52	21,0	33,4	13/03/2018	102	20,4	33,4
04/12/2017	3	18,7	33,0	23/01/2018	53	20,0	33,8	14/03/2018	103	20,5	34,9
05/12/2017	4	19,2	33,3	24/01/2018	54	19,4	32,8	15/03/2018	104	20,1	33,1
06/12/2017	5	19,6	32,5	25/01/2018	55	19,7	33,0	16/03/2018	105	21,3	32,3
07/12/2017	6	19,4	29,8	26/01/2018	56	20,1	30,9	17/03/2018	106	20,4	32,6
08/12/2017	7	20,7	31,6	27/01/2018	57	20,2	30,6	18/03/2018	107	19,9	33,3
09/12/2017	8	19,3	31,2	28/01/2018	58	20,2	32,0	19/03/2018	108	20,6	34,2
10/12/2017	9	19,0	31,9	29/01/2018	59	20,7	31,2	20/03/2018	109	20,5	34,3
11/12/2017	10	18,6	33,8	30/01/2018	60	18,8	22,7	21/03/2018	110	19,0	30,0
12/12/2017	11	17,6	29,1	31/01/2018	61	15,6	29,5	22/03/2018	111	18,2	30,6
13/12/2017	12	16,6	31,8	01/02/2018	62	16,4	31,2	23/03/2018	112	19,0	33,0
14/12/2017	13	17,2	33,1	02/02/2018	63	17,4	30,1	24/03/2018	113	20,1	31,2
15/12/2017	14	19,8	33,8	03/02/2018	64	17,9	31,4	25/03/2018	114	19,2	31,4
16/12/2017	15	19,3	33,9	04/02/2018	65	17,9	30,6	26/03/2018	115	19,9	30,2
17/12/2017	16	20,3	33,8	05/02/2018	66	17,4	29,8	27/03/2018	116	18,8	28,6
18/12/2017	17	20,7	33,4	06/02/2018	67	16,2	30,1	28/03/2018	117	17,6	32,0
19/12/2017	18	19,8	34,0	07/02/2018	68	15,8	31,3	29/03/2018	118	18,2	31,5
20/12/2017	19	19,2	31,7	08/02/2018	69	15,7	33,8	30/03/2018	119	20,0	31,4
21/12/2017	20	19,0	23,0	09/02/2018	70	17,0	34,5	31/03/2018	120	18,5	30,8
22/12/2017	21	20,0	27,5	10/02/2018	71	22,1	30,0	01/04/2018	121	19,7	29,6
23/12/2017	22	19,8	31,1	11/02/2018	72	21,0	31,7	02/04/2018	122	20,1	28,4
24/12/2017	23	20,6	31,4	12/02/2018	73	19,9	32,5	03/04/2018	123	18,2	27,2
25/12/2017	24	19,9	30,1	13/02/2018	74	19,7	27,6	04/04/2018	124	18,1	29,8
26/12/2017	25	19,7	31,7	14/02/2018	75	18,5	24,4	05/04/2018	125	15,8	30,1
27/12/2017	26	20,7	31,8	15/02/2018	76	18,9	25,0	06/04/2018	126	16,1	29,7
28/12/2017	27	21,9	31,1	16/02/2018	77	16,2	30,6	07/04/2018	127	16,4	31,5
29/12/2017	28	19,3	29,0	17/02/2018	78	16,8	31,1	08/04/2018	128	17,0	31,0
30/12/2017	29	19,4	25,4	18/02/2018	79	19,1	25,4	09/04/2018	129	18,2	31,3
31/12/2017	30	20,0	28,8	19/02/2018	80	18,9	28,2	10/04/2018	130	17,6	31,2
01/01/2018	31	19,3	29,8	20/02/2018	81	19,6	30,1	11/04/2018	131	16,8	31,4
02/01/2018	32	21,0	29,4	21/02/2018	82	20,2	30,3	12/04/2018	132	14,4	28,7
03/01/2018	33	20,9	29,2	22/02/2018	83	18,1	32,1	13/04/2018	133	16,2	31,4
04/01/2018	34	19,3	31,5	23/02/2018	84	18,6	31,3	14/04/2018	134	18,6	29,4
05/01/2018	35	17,8	31,8	24/02/2018	85	18,2	31,3	15/04/2018	135	18,5	26,6
06/01/2018	36	18,7	30,0	25/02/2018	86	17,5	31,1	16/04/2018	136	17,8	25,6
07/01/2018	37	18,0	23,8	26/02/2018	87	18,0	28,7	17/04/2018	137	15,1	27,6
08/01/2018	38	18,5	24,4	27/02/2018	88	18,6	27,9	18/04/2018	138	12,6	28,8
09/01/2018	39	18,9	26,7	28/02/2018	89	18,5	32,5	19/04/2018	139	10,8	28,7
10/01/2018	40	18,4	31,5	01/03/2018	90	19,7	33,2	20/04/2018	140	12,1	27,6
11/01/2018	41	18,8	31,2	02/03/2018	91	19,1	31,7	21/04/2018	141	10,3	27,5
12/01/2018	42	18,6	26,9	03/03/2018	92	20,2	30,9	22/04/2018	142	13,3	30,0
13/01/2018	43	18,3	29,6	04/03/2018	93	21,1	33,0	23/04/2018	143	15,6	29,7
14/01/2018	44	18,7	29,1	05/03/2018	94	19,6	32,7	24/04/2018	144	14,2	29,8
15/01/2018	45	19,7	31,3	06/03/2018	95	19,0	33,7	25/04/2018	145	14,6	30,6
16/01/2018	46	19,8	29,7	07/03/2018	96	20,2	32,4	26/04/2018	146	14,8	30,9
17/01/2018	47	20,4	32,6	08/03/2018	97	20,2	29,2	27/04/2018	147	15,6	31,1
18/01/2018	48	20,2	33,1	09/03/2018	98	17,4	31,4	28/04/2018	148	16,4	31,0
19/01/2018	49	19,8	31,4	10/03/2018	99	18,9	31,0	29/04/2018	149	16,7	30,4

4.3.2 Chuva

Os valores de chuva referentes à safra 2017/2018, em Piracicaba-SP, estão apresentados nas Tabela 41.

Tabela 41 - Valores de chuva (C, mm). Piracicaba-SP. Posto agrometeorológico. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Safra 2017/2018.

Data	i	C	Data	i	C	Data	i	C
01/12/2017	1	1,8	20/01/2018	51	1,8	11/03/2018	101	0,0
02/12/2017	2	0,0	21/01/2018	52	0,0	12/03/2018	102	0,0
03/12/2017	3	0,0	22/01/2018	53	0,2	13/03/2018	103	0,0
04/12/2017	4	0,0	23/01/2018	54	39,4	14/03/2018	104	20,0
05/12/2017	5	0,0	24/01/2018	55	0,0	15/03/2018	105	8,6
06/12/2017	6	6,2	25/01/2018	56	6,9	16/03/2018	106	1,3
07/12/2017	7	9,7	26/01/2018	57	0,0	17/03/2018	107	0,0
08/12/2017	8	0,0	27/01/2018	58	0,0	18/03/2018	108	0,0
09/12/2017	9	0,0	28/01/2018	59	0,3	19/03/2018	109	0,0
10/12/2017	10	0,3	29/01/2018	60	4,0	20/03/2018	110	36,8
11/12/2017	11	0,0	30/01/2018	61	16,5	21/03/2018	111	18,1
12/12/2017	12	0,0	31/01/2018	62	0,0	22/03/2018	112	0,0
13/12/2017	13	0,0	01/02/2018	63	0,0	23/03/2018	113	0,0
14/12/2017	14	0,0	02/02/2018	64	0,0	24/03/2018	114	0,0
15/12/2017	15	0,8	03/02/2018	65	0,0	25/03/2018	115	0,0
16/12/2017	16	0,3	04/02/2018	66	0,0	26/03/2018	116	20,0
17/12/2017	17	0,0	05/02/2018	67	0,0	27/03/2018	117	0,0
18/12/2017	18	0,0	06/02/2018	68	0,0	28/03/2018	118	0,0
19/12/2017	19	3,2	07/02/2018	69	0,0	29/03/2018	119	0,0
20/12/2017	20	0,0	08/02/2018	70	0,0	30/03/2018	120	0,0
21/12/2017	21	20,1	09/02/2018	71	0,0	31/03/2018	121	27,2
22/12/2017	22	5,6	10/02/2018	72	0,0	01/04/2018	122	18,3
23/12/2017	23	1,5	11/02/2018	73	0,3	02/04/2018	123	0,0
24/12/2017	24	0,0	12/02/2018	74	0,0	03/04/2018	124	15,5
25/12/2017	25	5,1	13/02/2018	75	1,3	04/04/2018	125	0,0
26/12/2017	26	0,0	14/02/2018	76	25,9	05/04/2018	126	0,0
27/12/2017	27	0,0	15/02/2018	77	5,3	06/04/2018	127	0,0
28/12/2017	28	17,3	16/02/2018	78	0,0	07/04/2018	128	0,0
29/12/2017	29	33,3	17/02/2018	79	17,0	08/04/2018	129	0,0
30/12/2017	30	18,3	18/02/2018	80	19,3	09/04/2018	130	0,0
31/12/2017	31	25,1	19/02/2018	81	0,0	10/04/2018	131	0,0
01/01/2018	32	2,8	20/02/2018	82	0,3	11/04/2018	132	0,0
02/01/2018	33	0,3	21/02/2018	83	0,0	12/04/2018	133	1,3
03/01/2018	34	5,1	22/02/2018	84	0,0	13/04/2018	134	0,0
04/01/2018	35	0,0	23/02/2018	85	0,0	14/04/2018	135	0,0
05/01/2018	36	0,0	24/02/2018	86	0,0	15/04/2018	136	0,0
06/01/2018	37	5,8	25/02/2018	87	0,0	16/04/2018	137	0,0
07/01/2018	38	3,8	26/02/2018	88	2,0	17/04/2018	138	0,0
08/01/2018	39	7,8	27/02/2018	89	0,0	18/04/2018	139	0,0
09/01/2018	40	0,0	28/02/2018	90	0,2	19/04/2018	140	0,0
10/01/2018	41	0,0	01/03/2018	91	16,0	20/04/2018	141	0,0
11/01/2018	42	28,4	02/03/2018	92	5,8	21/04/2018	142	0,0
12/01/2018	43	16,5	03/03/2018	93	0,0	22/04/2018	143	0,0
13/01/2018	44	7,4	04/03/2018	94	0,3	23/04/2018	144	0,0
14/01/2018	45	24,4	05/03/2018	95	0,0	24/04/2018	145	0,0
15/01/2018	46	34,3	06/03/2018	96	4,4	25/04/2018	146	0,0
16/01/2018	47	1,0	07/03/2018	97	46,0	26/04/2018	147	0,0
17/01/2018	48	13,0	08/03/2018	98	0,0	27/04/2018	148	0,0
18/01/2018	49	3,0	09/03/2018	99	0,0	28/04/2018	149	0,0
19/01/2018	50	2,3	10/03/2018	100	0,0	29/04/2018	150	0,0
						30/04/2018	151	0,0

4.3.3 Índice de área foliar

As Tabelas 42 e 43 apresentam as médias dos valores de índice de área foliar (IAF) para os quatro cultivares de soja nos sistemas de produção estudados, respectivamente sistema de produção irrigado e sequeiro.

Tabela 42 - Valores de índice de área foliar (IAF, $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$). Sistema de produção: irrigado. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Experimento I. Safra 2017/2018. Piracicaba, SP.

Semeadura	Colheita	Genótipo	IAF		
			R ₁	R ₃	R ₅
01/12/2017	07/04/2018	(1) BMX-Ativa-RR	2,26 ns ¹	3,14 c*	3,28 c
01/12/2017	07/04/2018	(2) BMX-Lança-RR	2,02	4,53 ab	4,31 ab
01/12/2017	28/04/2018	(3) BRS-GO-7460-RR	2,33	4,72 a	4,67 a
01/12/2017	29/04/2018	(4) BMX-Desafio-RR	1,63	3,98 ab	3,49 bc
Média	-	-	2,06	4,09	3,93
CV (%) ¹	-	-	22,06	21,13	13,74

* Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 10% de probabilidade.

¹ CV: Coeficiente de variação (%).

Tabela 43 - Valores de índice de área foliar (IAF, $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$). Sistema de produção: sequeiro. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Experimento II. Safra 2017/2018. Piracicaba, SP.

Semeadura	Colheita	Genótipo	IAF		
			R ₁	R ₃	R ₅
01/12/2017	07/04/2018	(1) BMX-Ativa-RR	2,38 a*	3,75 ns ¹	3,79 c
01/12/2017	24/03/2018	(2) BMX-Lança-RR	2,20 ab	5,31	5,18 b
01/12/2017	22/04/2018	(3) BRS-GO-7460-RR	2,29 a	6,15	7,23 a
01/12/2017	22/04/2018	(4) BMX-Desafio-RR	1,76 b	5,45	4,13 bc
Média	-	-	2,16	5,17	5,08
CV (%) ¹	-	-	15,10	36,78	13,17

* Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 10% de probabilidade.

¹ CV: Coeficiente de variação (%).

Observa-se em ambos os sistemas de produção (Tabelas 44 e 45), entre os quatro cultivares, um aumento no valor de IAF do início do florescimento (R₁) para o início da frutificação (R₃) com posterior manutenção deste índice até o início do enchimento de grãos (R₅). Esses resultados corroboram com Heiffig et al. (2006), que trabalhando com a relação entre o índice de área foliar e arranjos espaciais para a cultura de soja, também observaram

aumento do IAF entre os estádios fenológicos R₁ e R₅, sendo o valor máximo observado no estádio fenológico R₅.

Porém, apesar dos sistemas produtivos apresentarem a mesma tendência, em média, o sistema de produção de sequeiro apresentou maiores valores de IAF durante os três estádios fenológicos avaliados (R₁: 2,16 m² m⁻², R₃: 5,17 m² m⁻² e R₅: 5,08 m² m⁻²).

A definição clássica de índice de área foliar, segundo Watson (1947), baseia-se na relação entre a área foliar do dossel e a unidade de superfície projetada no solo, caracterizando-se como uma variável biofísica.

A determinação da área foliar é importante na avaliação da eficiência fotossintética das plantas, na determinação de danos bióticos e abióticos na cultura, em estudos de análise de crescimento e por ser um grande condicionante da produtividade comercial da cultura (SETIYONO et al., 2008).

4.3.4 Massa de matéria seca de parte aérea

Os valores de massa de matéria seca de parte aérea referentes aos Experimentos I e II (Piracicaba-SP. Safra 2017/2018) estão apresentados nas Tabelas 44 e 45 (valores correspondentes aos quatro cultivares).

Tabela 44 - Valores de massa de matéria seca de parte aérea (MSPA, g planta⁻¹). Sistema de produção: irrigado. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Experimento I. Safra 2017/18. Piracicaba, SP.

Semeadura	Colheita	Genótipo	MSPA		
			R ₁	R ₃	R ₅
01/12/2017	07/04/2018	(1) BMX-Ativa-RR	77,13 ns ¹	147,15 ns	335,71 ab*
01/12/2017	07/04/2018	(2) BMX-Lança-RR	61,49	152,24	358,51 a
01/12/2017	28/04/2018	(3) BRS-GO-7460-RR	64,96	173,46	314,45 ab
01/12/2017	29/04/2018	(4) BMX-Desafio-RR	55,31	171,65	251,74 b
Média	-	-	64,72	161,12	315,10
CV (%) ¹	-	-	20,30	24,08	16,55

* Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 10% de probabilidade.

¹ CV: Coeficiente de variação (%)

Tabela 45 - Valores de massa de matéria seca de parte aérea (MSPA, g). Sistema de produção: sequeiro. Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Experimento II. Safra 2017/2018. Piracicaba, SP.

Semeadura	Colheita	Genótipo	MSPA		
			R ₁	R ₃	R ₅
01/12/2017	07/04/2018	(1) BMX-Ativa-RR	87,26 ns ¹	158,09 c*	378,30 ab
01/12/2017	24/03/2018	(2) BMX-Lança-RR	74,42	168,94 c	470,25 a
01/12/2017	22/04/2018	(3) BRS-GO-7460-RR	76,81	313,72 a	425,78 ab
01/12/2017	22/04/2018	(4) BMX-Desafio-RR	67,82	229,58 b	352,09 b
Média	-	-	76,57	217,58	406,60
CV (%) ¹	-	-	14,42	13,89	15,40

* Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 10% de probabilidade.

¹ CV: Coeficiente de variação (%).

4.3.5 Altura de inserção da primeira vagem

Os valores de altura de inserção da primeira vagem referentes aos Experimentos I e II (Piracicaba-SP. Safra 2017/2018) estão apresentados nas Tabelas 46 e 47 (valores correspondentes aos quatro cultivares).

Tabela 46 - Valores de altura de inserção da primeira vagem (INS, cm). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Experimento I (sistema de produção: irrigado). Safra 2017/2018. Piracicaba, SP.

Semeadura	Colheita	Genótipo	INS
01/12/2017	07/04/2018	(1) BMX-Ativa-RR	6,55 c*
01/12/2017	07/04/2018	(2) BMX-Lança-RR	13,98 a
01/12/2017	28/04/2018	(3) BRS-GO-7460-RR	10,32 b
01/12/2017	29/04/2018	(4) BMX-Desafio-RR	6,25 c
Média	-	-	9,27
CV (%) ¹	-	-	12,14

* Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 10% de probabilidade.

¹ CV: Coeficiente de variação (%).

Tabela 47 - Valores de altura de plantas (INS, cm). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Experimento II (sistema de produção: sequeiro). Safra 2017/2018. Piracicaba, SP.

Semeadura	Colheita	Genótipo	INS
01/12/2017	07/04/2018	(1) BMX-Ativa-RR	3,00 c *
01/12/2017	24/03/2018	(2) BMX-Lança-RR	6,32 a
01/12/2017	22/04/2018	(3) BRS-GO-7460-RR	3,37 bc
01/12/2017	22/04/2018	(4) BMX-Desafio-RR	4,40 b
Média	-	-	4,27
CV (%) ¹	-	-	17,99

* Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 10% de probabilidade.

¹ CV: Coeficiente de variação (%).

4.3.6 Altura de planta

Os valores de altura de planta referentes aos Experimentos I e II (Piracicaba-SP. Safra 2017/2018) estão apresentados nas Tabelas 48 e 49 (valores correspondentes aos quatro cultivares).

Tabela 48 - Valores de altura de plantas (H, cm). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Experimento I (sistema de produção: irrigado). Safra 2017/2018. Piracicaba, SP.

Semeadura	Colheita	Genótipo	H		
			R ₁	R ₃	R ₅
01/12/2017	07/04/2018	(1) BMX-Ativa-RR	23,49 b *	35,02 b	39,20 b
01/12/2017	07/04/2018	(2) BMX-Lança-RR	23,90 b	41,10 b	45,31 ab
01/12/2017	28/04/2018	(3) BRS-GO-7460-RR	30,96 a	57,77 a	52,06 a
01/12/2017	29/04/2018	(4) BMX-Desafio-RR	21,56 c	50,82 a	50,87 a
Média	-	-	24,98	46,18	46,86
CV (%) ¹	-	-	4,75	9,32	9,86

* Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 10% de probabilidade.

¹ CV: Coeficiente de variação (%).

Tabela 49 - Valores de altura de plantas (H, cm). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Experimento II (sistema de produção: sequeiro). Safra 2017/2018. Piracicaba, SP.

Semeadura	Colheita	Genótipo	H		
			R ₁	R ₃	R ₅
01/12/2017	07/04/2018	(1) BMX-Ativa-RR	18,56 b*	26,00 d	33,40 c
01/12/2017	24/03/2018	(2) BMX-Lança-RR	22,23 b	51,25 c	71,31 b
01/12/2017	22/04/2018	(3) BRS-GO-7460-RR	26,15 a	88,77 a	90,24 a
01/12/2017	22/04/2018	(4) BMX-Desafio-RR	21,82 b	60,13 b	70,20 b
Média	-	-	22,19	56,54	66,28
CV (%) ¹	-	-	10,37	5,98	4,68

* Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 10% de probabilidade.

¹ CV: Coeficiente de variação (%).

4.3.7 Componentes da produtividade

Os valores dos componentes da produtividade referentes aos Experimentos I e II (Piracicaba-SP. Safra 2017/2018) estão apresentados nas Tabelas 50 e 51 (valores correspondentes aos quatro cultivares).

Tabela 50 - Valores de número de vagens por planta (NV), número de grãos por planta (NG) e massa de mil grãos (MMG, g). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Experimento I (sistema de produção: irrigado). Safra 2017/2018. Piracicaba, SP.

Semeadura	Colheita	Genótipo	NV	NG	MMG
01/12/2017	07/04/2018	(1) BMX-Ativa-RR	28,89 c*	1097,2 c	222,81 a
01/12/2017	07/04/2018	(2) BMX-Lança-RR	40,34 b	1206,0 bc	182,57 b
01/12/2017	28/04/2018	(3) BRS-GO-7460-RR	61,39 a	1338,2 ab	155,65 c
01/12/2017	29/04/2018	(4) BMX-Desafio-RR	61,39 a	1378,2 a	168,73 bc
Média	-	-	48,00	1254,9	182,44
CV (%) ¹	-	-	11,41	6,90	9,10

* Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 10% de probabilidade.

¹ CV: Coeficiente de variação (%).

Tabela 51 - Valores de número de vagens por planta (NV), número de grãos por planta (NG) e massa de mil grãos (MMG, g). Departamento de Produção Vegetal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Experimento II (sistema de produção: sequeiro). Safra 2017/2018. Piracicaba, SP.

Semeadura	Colheita	Genótipo	NV	NG	MMG
01/12/2017	07/04/2018	(1) BMX-Ativa-RR	26,56 b*	720,6 b	261,04 a
01/12/2017	24/03/2018	(2) BMX-Lança-RR	60,88 a	1462,2 a	173,02 b
01/12/2017	22/04/2018	(3) BRS-GO-7460-RR	61,07 a	1497,2 a	189,28 b
01/12/2017	22/04/2018	(4) BMX-Desafio-RR	70,62 a	1771,0 a	193,16 b
Média	-	-	54,78	1362,7	204,13
CV (%) ¹	-	-	11,59	15,12	9,32

* Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 10% de probabilidade.

¹ CV: Coeficiente de variação (%).

5 CONCLUSÕES

O método proposto pressupõe a diminuição da produtividade potencial da cultura de soja nos seguintes casos: (i) elevada nebulosidade (o aumento da nebulosidade resulta em uma menor eficiência de fotoperíodo); (ii) elevado desvio entre a temperatura do ar do ambiente de produção e a temperatura ótima (27,9°C) da cultura de soja; e (iii) elevado desvio entre o índice de área foliar máximo determinado experimentalmente e o índice de área foliar máximo ótimo (5,29 m² m⁻²).

REFERÊNCIAS

ALLIPRANDINI, L. F.; ABATTI, C.; BERTAGNOLLI, P. F.; CAVASSIM, J. E.; GABE, H. L.; KUREK, A.; MATSUMOTO, M. N.; OLIVEIRA, M. A. R.; PITOL, C.; PRADO, L. C.; STECKING, C. Understanding soybean maturity groups in Brazil: environment, cultivar classification, and stability. *Crop Science*, Madison, v. 49, p. 801-808, 2009.

ASSAD, E. D.; MARIN, F. R.; EVANGELISTA, S. R.; PILAU, F. G.; FARIAS, J. R. B.; PINTO, H. S.; JÚNIOR, J. Z. Forecast system of soybean crop yield for Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 42, n. 5, p. 615-625, 2007.

BATTISTI, R. Épocas de semeadura da cultura da soja com base no risco climático e na rentabilidade líquida para as principais regiões produtoras do Brasil. Dissertação 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" – USP. Piracicaba, 2013.

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C.; PILAU, F. G.; WOLLMANN, C. A. Eficiência climática para as culturas da soja e do trigo no estado do Rio Grande do Sul em diferentes datas de semeadura. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 43, n. 3, p. 390-396, mar, 2013.

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C.; PILAU, F. G. Eficiência agrícola da produção de soja, milho e trigo no estado do Rio Grande do Sul. *Ciência Rural*, v. 42, p. 24-30, 2012.

BERGAMASCHI, H.; WHEELER, T. R.; CHALLINOR, A. J.; COMIRAN, F.; MACHADOHECKLER, B. M. Maize yield and rainfall on different spatial and temporal scales in Southern Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 42, p. 603-613, 2007.

BERLATO, M. A. Modelo de relação entre o rendimento de grãos de soja e o déficit hídrico para o Estado do Rio Grande do Sul. 1987. 93p. Tese (Doutorado em Meteorologia), Curso de Pós-graduação em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1987.

BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C. El Niño e La Niña: impactos no clima, na vegetação e na agricultura do Rio Grande do Sul; aplicações de previsões climáticas na agricultura. Porto Alegre: UFRGS, 2003. 110 p.

BERNARD, R. L.; CHAMBERLAIN, D. W.; LAWRENCE, R. D. Results of the cooperative uniform soybean test. Washington: USDA, 134 p. 1965.

BONATO, E. R.; BERTAGNOLLI, P. F.; IGNAZACK, J. C.; TRAGNAGO, J. L.; RUBIN, S. A. L. Desempenho de cultivares de soja em três épocas de semeadura, no Rio Grande do Sul. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 33, n. 6, p. 879-884, jun. 1998.

BONNECARRÈRE, R. A. G.; DOURADO-NETO, D.; MARTIN, T. N.; PEREIRA, A. R.; MANFRON, P. A. Estimativa das produtividades potencial e deplecionada da cultura do milho no Estado do Rio Grande do Sul em função das condições climáticas. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 15, p. 280-288, 2007.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Regras para análise de sementes. Brasília, 1992. 365 p.

CÂMARA, G. M. S.; SEDIYAMA, T.; DOURADO-NETO, D.; BERNARDES, M. S. Influence of photoperiod and air temperature on the growth, flowering and maturation of soybean (*Glycine max* (L.) Merrill). *Scientia Agricola*, Piracicaba, v. 54, p. 149-154, 1997.

CAMARGO, M. B. P.; BRUNINI, O.; MIRANDA, M. A. C. Temperatura-base para cálculo dos graus-dia para cultivares de soja em São Paulo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 22, p. 115-121, 1987.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos. Décimo levantamento. Brasília, 171 p. 2017.

CUNHA, G. R.; BARNI, N. A.; HAAS, J. C.; MALUF, J. R. T.; MATZENAUER, R.; PASINATO, A.; PIMENTEL, B. M.; PIRES, J. L. F. Zoneamento agrícola e época de semeadura para soja no Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Passo Fundo, v. 9, n. 3, p. 446-459, 2001. Número Especial – Zoneamento Agrícola.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Efeito da água no rendimento das culturas. Trad. GHEYI, H. Campina Grande: UFPB, 1994. 306 p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 33).

DOURADO-NETO, D.; JONG VAN LIER, Q. Programa para elaboração do balanço hídrico. Piracicaba, ESALQ/USP, 1991.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Embrapa Soja. Cultivares de soja 2011/2012: Região Centro-sul do Brasil. EMBRAPA Soja, Londrina, 2011. 52 p.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Embrapa Soja. Disponível em: <http://www.cnpso.embrapa.br/index.php?op_page=294&cod_pai=17>. Acesso em: 25 jun. 2017.

FAGAN, E. B. A cultura da soja: modelo de crescimento e aplicação da estrobilurina piraclostrobina. 2007. 83p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. Ecofisiologia da soja. Londrina: Embrapa CNPSO, 2007. 9 p. (Circular Técnica, 48).

FARIAS, J. R. B.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L. Soja. In: MONTEIRO, J.E.B.A. Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola. Brasília: INMET, 2009. Cap. 15, p. 261-278.

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. Stages of soybean development. Ames: Iowa State University, 1977. 11 p. (Special Report, 80).

FIETZ, C. R.; RANGEL, M. A. S. Época de semeadura da soja para a região de Dourados – MS, com base na deficiência hídrica e no fotoperíodo. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 28, p. 666-672, 2008.

FLORENCIO, V. H. R. Caracterização de variedades cultivadas de soja de diferentes grupos de maturação em função dos atributos morfológicos, fenológicos e a produtividade. Dissertação 2017. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – USP. Piracicaba, 2017.

HAMAWAKI, O. T.; POLIZEL, A. C.; JULIATTI, F. C.; HAMAWAKI, R. L.; BRUNETTA, P. UFUS-Imperial: nova cultivar de soja para o Estado de Mato Grosso. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 42, p. 137-139, 2007.

HEIFFIG, L. S.; CÂMARA, G. M. S.; MARQUES, L. A.; PEDROSO, D. B.; PIEDADE, S. M. S. Fechamento e índice de área foliar na cultura da soja em diferentes arranjos espaciais. Bragantia, Campinas, v. 65, n. 2, p. 285-295, 2006.

HIRAKURI, M. H.; LAZZAROTTO, J. J. Evolução e perspectivas de desempenho econômico associadas com a produção de soja nos contextos mundial e brasileiro. 3. ed. Londrina: Embrapa Soja, 2011. (Documentos, Embrapa Soja, 319).

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produção agrícola municipal. Rio de Janeiro, 2010. Acesso em: 1 dez. 2011. Online. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>.

JOAQUIM, A. C.; BELLINASSO, I. F.; DONZELLI, J. L. Potencial de manejo de solos cultivados com cana-de-açúcar. In: VI Seminário de Tecnologia Agronômica, Coopersucar, ed. 1, 384 p. 1994.

KASTER, M.; FARIAS, J. R. B. Regionalização dos testes de VCU – Valor de Cultivo e uso de cultivares de soja – Terceira Aproximação. In: REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO CENTRAL DO BRASIL, 32., 2011. São Pedro). Resumos... Londrina: EMBRAPA Soja, 2011. p. 231-235.

LANDELL, M. G. A. Variedades de cana-de-açúcar para o centro sul do Brasil: liberação do programa cana IAC (1959-2004). Marcos Guimarães de Andrade Landell et al. - Campinas: Instituto Agrônomo, 2004, 33 p. 2004.

LEB. Laboratório de Engenharia de Biossistemas. Dados climáticos da base de dados meteorológicos: Estação automática, posto agrometeorológico – Área de Física e Meteorologia, Departamento de Engenharia de Biossistemas, Esalq/USP. Disponível em:<<http://www.esalq.usp.br/departamentos/leb/automatica/pagina5.html>>. Acesso em: 16 jul. 2017.

LI-COR®. LI 3100 area meter instruction manual. Lincoln: LI-COR®, 1996. 34p.

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Portarias de zoneamento agrícola de risco climático. Acesso em: 11 jan. 2012. Online. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/politica-agricola/zoneamento-agricola>>.

MARIN, F. R.; LOPES-ASSAD, M. L.; ASSAD, E. D.; VIAN, C. E.; SANTOS, M. C. Sugarcane crop efficiency in two growing seasons in São Paulo State, Brazil. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 43, n. 11, p. 1449-1455, 2008.

NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L.; FARIAS, J. R. B.; OYA, T. Estádios de desenvolvimento da cultura de soja. In: BONATTO, E.R. Estresses em soja. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000. Cap. 1, p. 19-44.

PENNING DE VRIES, F. W. T.; JANSEN, D. M.; TEN BERGE, H. F. M.; BAKEMA, A. Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops. Wageningen: Centre for Agricultural Publishing and Documentation (Pudoc), 1989. 271 p.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478 p.

PRADO, H. A pedologia simplificada. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, dez. 2005. (Arquivo do Agrônomo, 1).

PRADO, H. Condições químicas dos horizontes sub superficiais para manejo. Fertibio. Lages. 2004. CD-ROM.

PRADO, H.; JONG VAN LIER, Q.; LANDELL, M. G. A.; VASCONCELOS, A. C. M. Classes de disponibilidade de água para a cana-de-açúcar nos principais solos da região Centro-Sul do Brasil. In: Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, 13., 2003, Juazeiro. Anais... 1 CD ROM.

PRADO, H.; LANDELL, M. G. A.; ROSSETO, R. A importância do conhecimento pedológico nos ambientes de produção de cana-de-açúcar. In: Reunião Brasileira de manejo e conservação de solo e água, n. 2002, Cuiabá-MT, Anais. Cuiabá, SBCS: 2002. CD-ROM.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. Viena: R Foundation for Statistical Computing, 2013.

VAN RAIJ, B. Fertilidade do solo e adubação. Piracicaba: Potafos: Ceres, 1991.

VAN RAIJ, B.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo. 2.ed. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas, 1996. (Boletim, 100).

RAMBO, L.; COSTA, J. A.; PIRES, J. L. F.; PARCIANELLO, G.; FERREIRA, F. G. Rendimento de grãos da soja em função do arranjo de plantas. Ciência Rural, Santa Maria, v. 33, n. 3, p. 405-411, 2003.

RODRIGUES, O.; DIDONET, A. D.; LHAMBY, J. C. B.; BERTAGNOLLI, P. F.; LUZ, J. A. Resposta quantitativa do florescimento da soja à temperatura e ao fotoperíodo. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 36, p. 431-437, 2001.

RODRIGUES, O.; TEIXEIRA, M. C.; DIDONET, A. D.; LHAMBY, J. C. B.; SÓRIO, I. Efeito do fotoperíodo e da temperatura do ar no desenvolvimento da área foliar em soja (*Glycine max* (L.) Merrill). Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2006. 27 p.

SEDIYAMA, T.; TEIXEIRA, R. C.; BARROS, H. B. Origem, evolução e importância econômica. In: SEDIYAMA, T. (Ed.). Tecnologias de produção e usos da soja. Londrina: Mecenias, 2009.

SILVA, R. C. B. Germinação e desenvolvimento inicial de plântulas de melancia submetidas ao aumento do CO₂, temperatura e salinidade. 2012. 88 p. Dissertação (Mestrado em Horticultura Irrigada). Universidade do Estado da Bahia, Juazeiro, 2012.

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

THORNTHWAITE, C. W. An approach towards a rational classification of climate. *Geographical Review*, London, n. 38, p. 55-94, 1948.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, R. J. The water Balance. New Jersey: Laboratory of Climatology, v. 8, 1955. 104 p. (Publication in Climatology).

USDA. United States Department of Agriculture. Soybeans and oil crops. 2013. Disponível em: <<http://www.ers.usda.gov/topics/crops/soybeans-oilcrops/background.aspx>>. Acesso em: 27 jun. 2017.

VENTIMIGLIA, L. A.; COSTA, J. L.; THOMAS, A. L.; PIRES, J. L. F. Potencial de rendimento da soja em razão da disponibilidade de fósforo no solo e dos espaçamentos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 34, n. 2, p. 195-199, 1999.

WATSON, D. J. Comparative physiological studies on growth of field crops: I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. *Annals of Botany*, v. 11, p. 41-76, 1947.

ZHANG, M.; DUAN, L.; TIAN, X.; HE, Z.; LI, J.; WANG, B.; LI, Z. Uniconazole - induced tolerance of soybeans to water deficit in relation to changes in photosynthesis, hormones and antioxidant system. *Journal of Plant Physiology*, Stuttgart, v. 164, p. 709-717, 2007.