

MARIANA PEDUTI VICENTINI SAB

**FISIOLOGIA E PRODUTIVIDADE DA SOJA EM FUNÇÃO DO PARCELAMENTO DA
ADUBAÇÃO POTÁSSICA**

Botucatu

2021

MARIANA PEDUTI VICENTINI SAB

**FISIOLOGIA E PRODUTIVIDADE DA SOJA EM FUNÇÃO DO PARCELAMENTO DA
ADUBAÇÃO POTÁSSICA**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Campus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Agricultura).

Orientador: Prof. Dr. Marcelo de Almeida Silva

Botucatu

2021

S113f Sab, Mariana Peduti Vicentini

Fisiologia e produtividade da soja em função do parcelamento da adubação potássica / Mariana Peduti Vicentini Sab. -- Botucatu, 2021
60 p. : il., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu
Orientador: Marcelo de Almeida Silva

1. Fisiologia vegetal. 2. Soja. 3. Potássio. 4. Adubação. 5. Clorofila.
I. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Botucatu



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: FISIOLOGIA E PRODUTIVIDADE DA SOJA EM FUNÇÃO DO PARCELAMENTO DA ADUBAÇÃO POTÁSSICA

AUTORA: MARIANA PEDUTI VICENTINI SAB

ORIENTADOR: MARCELO DE ALMEIDA SILVA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em AGRONOMIA (AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. MARCELO DE ALMEIDA SILVA (Participação Virtual)
Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP


Prof. Dr. GIL MIGUEL DE SOUSA CÂMARA (Participação Virtual)
Produção Vegetal / Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz


Pesquisador Dr. SILVANO ABREU (Participação Virtual)
/ Consultoria Silvano Abreu Solos e Nutrição de Plantas

Botucatu, 08 de junho de 2021

AGRADECIMENTOS

À Faculdade de Ciências Agrônômicas da Universidade Estadual Paulista, Departamento de Produção e Melhoramento Vegetal, pela oportunidade de realização do mestrado e pela infraestrutura disponibilizada.

Ao meu orientador Prof. Dr. Marcelo de Almeida Silva, pela orientação na realização deste trabalho, pelos ensinamentos, compreensão e confiança ao longo do período do mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos que possibilitou a execução desta pesquisa.

Aos professores Dr. Ciro Antônio Rosolem, Dr. Edvaldo Aparecido Amaral da Silva e Dr. Juliano Carlos Calonego pelos equipamentos gentilmente cedidos, essenciais à realização deste trabalho.

À minha família pelo apoio, amor e incentivo em todas as etapas da minha vida.

Ao Vinicius Ribeiro Arantes, pelo cuidado, carinho, presença constante e ajuda incondicional ao longo desta caminhada.

À Ana Paula Matusevicius, irmã de coração, pela amizade e companheirismo de sempre.

A todos os integrantes do Laboratório de Ecofisiologia Aplicada à Agricultura (LECA), fundamentais no decorrer desta etapa, pela ajuda e pelos aprendizados.

Aos funcionários da FCA, em especial a Casemiro Edson Alves, Ciro Venancio de Oliveira, Flávio Cesar Galhardo e Dirceu Ferreira de Jesus, que não mediram esforços para que esta pesquisa se realizasse.

A todos os amigos que tornaram os anos do mestrado especiais.

A todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para a concretização deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

O desenvolvimento e a produtividade da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) são influenciados pela disponibilidade de nutrientes, tendo o potássio (K) grande importância por estar envolvido em diversos processos fisiológicos nas plantas. O objetivo desta pesquisa foi avaliar a fisiologia, o desenvolvimento e a produtividade da soja submetida à adubação potássica parcelada ou não em diferentes épocas de aplicação. O ensaio foi instalado no município de Botucatu-SP, com tratamentos constituídos por dose de 90 kg ha⁻¹ de K₂O, fornecida na forma de cloreto de potássio e aplicada da seguinte maneira: (T1) (testemunha - sem K₂O); (T2) (100% PS); (T3) (100% S); (T4) (100% V4); (T5) (100% R1); (T6) (75% PS, 25%V4); (T7) (75% PS, 25% R1); (T8) (25% PS, 75% V4), (T9) (25% PS, 75% R1), (T10) (75% S, 25% V4); (T11) (75% S, 25% R1); (T12) (25% S, 75% V4) e (T13) (25% S, 75% R1), em que PS corresponde à pré semeadura, S ao momento da semeadura, e V4 e R1 aos respectivos estádios fenológicos vegetativo e reprodutivo da soja. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com quatro repetições. Variáveis do solo [condutividade elétrica (CE), umidade e temperatura]; fisiológicas da planta [conteúdo de clorofilas e carotenoides, índice SPAD, taxa de assimilação líquida de CO₂ (A), condutância estomática (gs), concentração interna de CO₂ (Ci), taxa transpiratória (E), eficiência do uso da água (EUA) e eficiência de carboxilação (EC)]; biométricas da planta [altura, número de ramificações por planta, número de vagens chochas, número de vagens com um, dois três e quatro grãos, número total de vagens (NTV), número total de vagens viáveis (NTVV) e número de grãos por planta (NGPP)], e os componentes de produção [massa de 100 grãos (M100) e produtividade] foram avaliados. T2 e T12 ocasionaram plantas fisiologicamente mais ativas ao longo de todo o ciclo da cultura. Os teores de pigmentos cloroplastídicos e os parâmetros de trocas gasosas nesses tratamentos mantiveram-se elevados em todos os estádios avaliados, o que conjuntamente contribuiu para o melhor desenvolvimento das plantas. Observaram-se altas correlações entre produtividade e conteúdo de clorofilas (0,72 a 0,81), Ci (0,72 em R1 e 0,84 em R5), E (0,77 em R1 e 0,75 em R5), A (0,71 em R1) e gs (0,76 em R5). Sob T2 e T12, variáveis biométricas e componentes de produção também foram incrementados, principalmente NTV, NGPP (que se correlacionaram positivamente com a produtividade, com coeficientes de 0,73 e 0,78, respectivamente) e M100. Esses tratamentos, portanto, foram os mais produtivos, com médias de 2.823,0 kg ha⁻¹ em T2 (30% a mais em relação à testemunha) e 2.744,1 kg ha⁻¹ em T12 (26% superior à testemunha).

Palavras-chave: *Glycine max* (L.) Merrill; potássio; manejo da adubação; trocas gasosas; conteúdo de clorofila.

ABSTRACT

Soybean (*Glycine max* (L) Merrill) development and grain yield are influenced by nutrients availability, especially potassium (K), of great importance for being involved in several physiological plant processes. The objective of this work was to evaluate plant physiology, development, and yield of soybean under different potassium management in the field. The study was installed in Botucatu, Sao Paulo, Brazil. Treatments consisted of 90 kg ha⁻¹ of K₂O, provided as KCl, broadcast applied as follow: (T1) (control, no K₂O); (T2) (100% Pre planting - PS); (T3) (100% at planting date - S); (T4) (100% in V4); (T5) (100% in R1); (T6) (75% PS, 25% V4); (T7) (75% PS, 25% R1); (T8) (25% PS, 75% V4), (T9) (25% PS, 75% R1), (T10) (75% S, 25% V4); (T11) (75% S, 25% R1); (T12) (25% S, 75% V4) and (T13) (25% S, 75% R1), in which PS corresponds to pre-sowing, S to sowing day, and V4 and R1 to the respective vegetative and reproductive soybean phenological stages. The experimental design was in randomized complete blocks design, with four replications. Soil variables [electrical conductivity (EC), soil moisture and soil temperature]; plant physiological [chlorophyll and carotenoid content, SPAD index, water use efficiency (EUA), carboxylation efficiency (EC), internal CO₂ concentration (*C_i*), net CO₂ assimilation rate (*A*), transpiratory rate (*E*) and stomatal conductance (*g_s*)]; plant biometrics [plant height, branches number per plant, hatched pods, pods with one, two three and four grains, total number of pods per plant, viable pods and number of grains per plant], and yield components [mass of 100 grains and grain yield] were obtained. T2 and T12 had more physiologically active plants throughout the crop cycle. In these treatments, chloroplast pigment contents and gas exchange parameters remained high in all stages evaluated, which together contributed to a better plant development. High correlations were observed among yield and chlorophyll contents (0.72 to 0.81), *C_i* (0.72 in R1 and 0.84 in R5), *E* (0.77 in R1 and 0.75 in R5), *A* (0.71 in R1) and *g_s* (0.76 in R5). Under T2 and T12, biometric variables and production components were also increased, mainly NTV, NGPP (which positively correlated with yield, with coefficients of 0.73 and 0.78, respectively) and M100. These treatments, therefore, were the most productive, with averages of 2,823.0 kg ha⁻¹ in T2 (30% higher in relation to the control) and 2,744.1 kg ha⁻¹ in T12 (26% higher than the control).

Keywords: *Glycine max* (L) Merrill; potassium; fertilization management; gas exchange; chlorophyll content.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1	A cultura da soja e sua importância	16
2.2	Potássio	16
2.3	Épocas e parcelamento de aplicação da adubação potássica	19
3	MATERIAL E MÉTODOS	21
3.1	Caracterização do local do ensaio	21
3.2	Tratamentos.....	23
3.3	Delineamento experimental	25
3.4	Avaliações	25
3.4.1	Condutividade elétrica, umidade e temperatura do solo	25
3.4.2	Pigmentos cloroplastídicos	25
3.4.3	Índice SPAD	26
3.4.4	Trocas gasosas	26
3.4.5	Componentes de produção e estimativa de produtividade	26
3.5	Análise estatística	27
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
4.1	Condutividade elétrica, umidade e temperatura do solo.....	28
4.2	Pigmentos cloroplastídicos.....	31
4.3	Índice SPAD	37
4.4	Trocas gasosas	40
4.5	Componentes de produção e estimativa de produtividade.....	45
4.6	Correlação Linear de Pearson	50
6	CONCLUSÕES	53
	REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é pertencente à família Fabaceae (leguminosas) e possui como centro de origem a região nordeste da China, sendo conhecida desde 3000 anos a.C. Foi originada pelo cruzamento de espécies selvagens de soja domesticadas na China. Sua disseminação do Oriente para o Ocidente ocorreu através das navegações (Embrapa, 2021).

A cultura da soja possui alto teor de proteínas, característica que possibilita diversas utilizações. É uma importante fonte de matéria prima para o biodiesel, sendo que no Brasil, o biodiesel de soja representa cerca de 68% (2019) da produção total do país (ANP, 2020). A participação econômica de alto valor também atende uma demanda cada vez maior por farelo de proteína, que inclui a matéria-prima para alimentação de animais confinados para a produção de carne, ovos e leite (De Oliveira; Coelho, 2017).

Conforme os dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) produção de soja na safra de 2019/20 foi de 124,8 milhões de toneladas, em uma área plantada de 36,9 milhões de hectares. Na safra de 2020/21 a produção alcançada foi de 135,9 milhões de toneladas, representando um incremento de 8,9% em relação a safra passada, em área de 38,5 milhões de hectares (CONAB, 2021).

Devido à importância da cultura para o Brasil, alguns fatores são relevantes para que as plantas de soja expressem todo seu potencial produtivo durante o ciclo, dentre os quais destaca-se a nutrição das plantas, principalmente em relação ao equilíbrio na quantidade de macronutrientes disponíveis no solo. De acordo com Sfredo (2008), para se alcançar o equilíbrio, é necessário que as operações de adubação e calagem estejam de acordo com a análise do solo, bem como todas as operações complementares. Para Board e Modali (2005), o manejo do solo de forma correta interfere diretamente na sua qualidade, proporcionando os níveis de fertilidade e condições adequadas para o desenvolvimento da cultura soja e obtenção de maior rendimento de grãos.

No cultivo de soja, as respostas produtivas são facilmente observadas devido à cultura ser altamente responsiva quanto à absorção e translocação de nutrientes, em

especial nitrogênio, fósforo e potássio, que são exportados em maior quantidade (Gabriel *et al.*, 2016). O nitrogênio e o potássio são os nutrientes mais extraídos pela soja e, de acordo com Gitti e Roscoe (2017), para cada tonelada de soja produzida a cultura exporta aproximadamente 20 kg de K_2O , representando mais de 50% do total extraído. Além da exportação de K, também ocorrem perdas por lixiviação e erosão. Sendo assim, a adubação de manutenção é de grande importância para que as quantidades de potássio perdidas sejam repostas (Silva; Lazarini, 2014).

Nas plantas o potássio participa de inúmeros processos fisiológicos, como fotossíntese, transporte de assimilados, ativação enzimática, além de ser fundamental para as relações hídricas, estando, então, diretamente relacionado à produtividade das culturas (Pettigrew, 2008). Sua deficiência pode prejudicar severamente o crescimento, o rendimento e a qualidade da produção, além de aumentar a susceptibilidade das plantas a doenças e pragas (Myers *et al.*, 2005).

Dentre as funções do potássio nas plantas, destaca-se o seu envolvimento no controle da abertura e fechamento estomático, condutância do mesófilo, manutenção da camada limítrofe foliar, síntese de clorofilas, regulação do balanço hídrico, ativação de enzimas da fotossíntese (Rubisco) e na translocação de fotoassimilados (Taiz *et al.*, 2017; Tränkner; Tavakol; Jáklí, 2018). Neste sentido, a adubação em cobertura com o nutriente torna-se fundamental, sendo importante levar em consideração à sua exportação e, perdas relacionadas à lixiviação e erosão (Vilela; Souza; Martha, 2007). Todavia, trabalhos envolvendo o momento adequado de aplicação do nutriente em cobertura na cultura da soja são escassos (Petter *et al.*, 2016; Cavalini *et al.*, 2018).

A adubação potássica na soja, quando realizada via sulco de semeadura, pode gerar redução da germinação das sementes, devido à salinidade e à alta solubilidade do nutriente, principalmente quando ocorre déficit hídrico, e perdas em decorrência de elevadas precipitações (lixiviação) (Bernardi *et al.*, 2009). Raij *et al.* (1996), com o objetivo de diminuir as perdas e reduzir o efeito da salinidade na germinação das sementes, recomendaram que o parcelamento da adubação com potássio seja realizado quando as doses a serem aplicadas estiverem entre 60 e 80 kg ha⁻¹, principalmente em solos que possuam baixos teores de argila.

Devido à elevada exigência produtiva e à baixa fertilidade dos solos brasileiros, as estratégias de manejo adotadas nas lavouras devem ser eficientes e precisas. A hipótese deste trabalho é que a determinação das melhores épocas de aplicação do potássio na cultura da soja possibilita melhor aproveitamento do nutriente pelas plantas, evitando-se as perdas por lixiviação e efeitos negativos da salinidade, o que elevaria as produtividades através de incrementos nos processos fisiológicos das plantas e componentes produtivos. Com isso, o objetivo desta pesquisa foi avaliar a fisiologia, o desenvolvimento e a produtividade da soja submetida à adubação potássica parcelada ou não em diferentes épocas de aplicação.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A cultura da soja e sua importância

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é uma espécie originária da China, pertencente à família Fabaceae, que além de estar distribuída geograficamente em todo o Brasil, impulsiona diversos setores da economia, mantendo milhares de empregos diretos e indiretos, fazendo com que seu cultivo se destaque no cenário agrícola brasileiro (Rocha *et al.*, 2018).

O cultivo da soja é considerado uma *commodity*, representando assim um dos principais produtos de exportação (Silva; Lazarini, 2014). O aumento da produtividade agrícola da soja deve vir acompanhado de um avanço no conhecimento das necessidades nutricionais de cada cultura, proporcionando assim o uso correto dos insumos agrícolas (Gonçalves Junior *et al.*, 2010).

Novas estratégias de manejo da cultura da soja vêm sendo estabelecidas, com o intuito de aumentar da produtividade e a eficiência na utilização da área cultivada. Os agricultores têm feito uso de diversas tecnologias que possibilita a redução dos custos de produção, aumento da produtividade e da rentabilidade (Hirakuri; Lazzarotto, 2014). O Brasil tornou-se o maior produtor de soja na safra de 2018/19 com 117,0 milhões de toneladas, representando 33% da produção mundial, que foi de 354,54 milhões de toneladas (USDA, 2019). A China ocupa a posição de maior importador mundial do grão de soja, responsável por importar 64,56% (USDA, 2019). Já na safra 2019/2020 foram colhidos 126 milhões de toneladas do grão, aumento de 7,6% em relação à safra anterior (USDA, 2020).

2.2 Potássio

O potássio (K) é um importante macronutriente para o crescimento e produtividade das plantas. Possui funções relacionadas a estratégias de aumento da produção agrícola e sua ausência induz várias respostas em diferentes níveis: morfológica, fisiológica, bioquímica e molecular (Hafsi *et al.*, 2014).

Alguns fatores são relevantes para que as plantas de soja expressem todo seu potencial produtivo durante o ciclo, dentre os quais destaca-se a nutrição das plantas, principalmente em relação ao equilíbrio na quantidade de macronutrientes disponíveis no solo. O K é um dos nutrientes essenciais para o desenvolvimento das plantas, desempenhando papel fundamental nos processos osmóticos que contribuem para turgor celular, fotossíntese e transpiração (Sharma *et al.*, 2013). A deficiência de K pode perturbar essas atividades diretamente e inibir o crescimento e o desenvolvimento das plantas (Miao *et al.*, 2010; Anschutz *et al.*, 2014).

Entre as diversas funções do K na planta, a regulação dos processos de turgor do tecido vegetal, como o controle estomático e da transpiração, são essenciais para aumentar a eficiência de uso da água pela cultura (Serafim *et al.*, 2012; Tränkner; Tavakol; Jákli, 2018).

Segundo Serafim *et al.* (2012), quando ocorre o acúmulo de K nas raízes, forma-se um gradiente de pressão osmótico que faz com que a água se direcione para esse órgão. De forma contrária, plantas com deficiência de K possuem maior dificuldade em absorver água e ficam mais suscetíveis ao estresse hídrico nos períodos em que o teor de água estiver abaixo do ponto crítico para a cultura. Em condições de baixa disponibilidade de K, também pode ocorrer o aumento da produção de radicais livres pelas plantas. A deficiência do nutriente altera o mecanismo de abertura e fechamento dos estômatos, causando a redução da fotoquímica e acúmulo de elétrons, os quais são desviados para a produção de espécies reativas de oxigênio. Sendo assim, a planta apresenta maior demanda de K em condições de estresse hídrico, com a finalidade de manter a fotossíntese e promover a proteção dos cloroplastos á danos oxidativos (Cakmak, 2005). Em adição, o K também é tem papel crucial na translocação de fotoassimilados no floema, atuando no carregamento e descarregamento da sacarose, gerando assim, a manutenção da taxa fotossintética, e evitando o desvio de elétrons para a geração de formas reativas de oxigênio (Tränkner; Tavakol; Jákli, 2018).

A nutrição adequada de plantas de soja com K, além de favorecer a fertilidade do solo, gera reflexos diretos no aumento dos componentes produtivos da cultura, como observado por Foloni e Rosolem (2008).

Como característica da deficiência de K em oleaginosas, ocorre o amarelecimento no ápice das folhas adultas, aparecimento de flores remanescentes, redução no número e tamanho das vagens, vagens sem semente, além de abertura precoce de vagens, com germinação e deterioração de sementes em seu interior (Mascarenhas *et al.*, 2013), podendo resultar em redução severa no crescimento e rendimento da planta (Hafsi *et al.*, 2014; Wang; Wu, 2015).

A principal fonte de K utilizada nas culturas produtoras de grãos é o cloreto de potássio (KCl), tanto em aplicações diretas quanto para a elaboração de fertilizantes formulados, por se tratar de um fertilizante de alta solubilidade, contendo 60% de K₂O (Gitti; Roscoe, 2017). Essa fonte, porém, possui elevado índice salino, sendo necessários alguns cuidados em sua utilização no sulco de semeadura. Recomenda-se não aplicar doses superiores a 50 kg ha⁻¹ de K₂O diretamente no sulco de plantio, uma vez, que pode afetar a germinação das sementes, principalmente em condições de déficit hídrico (Oliveira *et al.*, 2008).

O manejo da adubação com K, seja a fonte, a dose, o método de aplicação ou o momento de aplicação, é crucial para a manutenção e melhoria das produtividades de culturas agrícolas. Essa importância deve-se a união de fatores que favorecem as perdas por lixiviação, como: a forma em que se encontra o nutriente no solo (forma catiônica – K⁺, de alta solubilidade) e a baixa capacidade de troca catiônica (CTC) da maioria dos solos (Vilela; Souza; Silva, 2004).

No início da exploração agrícola os solos brasileiros detinham altas concentrações de K (0,51 a 0,77 cmol_c dm⁻³, equivalente a 200 a 300 mg dm⁻³ K₂O), apesar disso, o rendimento de grãos da soja não era elevado (Borkert *et al.*, 2005). Esse fato deve-se a um possível desequilíbrio nutricional e/ou ao baixo potencial genético das cultivares da época. Em adição, a resposta da cultura à adubação potássica está relacionada com a capacidade de exploração do solo e a quantidade do nutriente exportada pelos grãos (Borkert *et al.*, 2005).

De acordo com Pettigrew (2008), o rendimento de grãos em função da adubação potássica pode estar relacionado ao aumento nos componentes de produção, por exemplo: Voss *et al.* (1986) relataram que o número de vagens por planta e o peso de grãos aumentaram em resposta à adubação potássica. Coale e Grove (1990) também

verificaram o aumento no número de vagens por planta e de grãos por vagem em solos com alta concentração K.

2.3 Épocas e parcelamento de aplicação da adubação potássica

A adubação potássica geralmente é realizada na cultura da soja parte na semeadura, aplicando-se o fertilizante no sulco, e parte em cobertura a lanço. Como o K é um fertilizante salino e de fácil lixiviação para camadas inferiores do solo, a aplicação de altas doses no sulco de semeadura deve ser evitada. De modo geral, recomenda-se a aplicação do K em cobertura após a semeadura quando as doses requeridas do nutriente foram iguais ou superiores a 50 kg ha⁻¹, ou quando o teor de argila do solo for inferior a 40% (Embrapa, 2013).

O parcelamento da dose de K em cobertura possibilita o aumento da eficiência no uso do nutriente, evitando assim as perdas por lixiviação, e ainda a redução do efeito salino do fertilizante sobre as sementes na linha de semeadura (Moterle *et al.*, 2006; Bernardi *et al.*, 2009).

É possível também realizar a adubação a lanço antes da semeadura, sendo esta prática recomendada em condições nas quais a quantidade de fertilizante a ser aplicada na semeadura for muito alta, ou em solos de textura argilosa, com teores de K médios a elevados, ou seja, acima de 3,1 mmolc dm⁻³ (Silva; Lazarini, 2014).

Em áreas de semeadura direta antecipa-se a adubação através da aplicação total ou parcial da dose de fertilizantes recomendada para a cultura de verão no momento da fertilização da cultura antecessora, o que pode ser feito a lanço ou de forma incorporada (Francisco *et al.*, 2007).

De acordo com Matos *et al.* (2006), a adubação antecipada otimiza as operações e reduz os custos, já que o tempo das paradas de abastecimento da semeadora-adubadora é menor e o número necessário de conjuntos trator-semeadora diminui. Em adição, há uma redução nas perdas por lixiviação atrelada a menor quantidade de adubo no sulco de semeadura, além de proporcionar maior crescimento/desenvolvimento vegetativo da cultura (Foloni; Rosolem, 2008).

Na soja, o período de maior exigência e velocidade de absorção de K se dá estágio de crescimento vegetativo, mais precisamente aos 30 dias que antecedem o florescimento (Tanaka *et al.*, 1993).

Petter *et al.* (2016) estudaram o parcelamento de K na cultura do milho e observaram maior eficiência no uso do nutriente, diâmetro caulinar e altura de planta, quando 50% do K foi aplicado em semeadura e o restante em cobertura aos 30 dias após a semeadura. Bernardi *et al.* (2009) estudaram o efeito da época de aplicação de K na cultura do algodão, os autores relataram que a aplicação de KCl via sulco em pré-semeadura e em duas coberturas apresentou maior eficiência em comparação a apenas uma aplicação em cobertura.

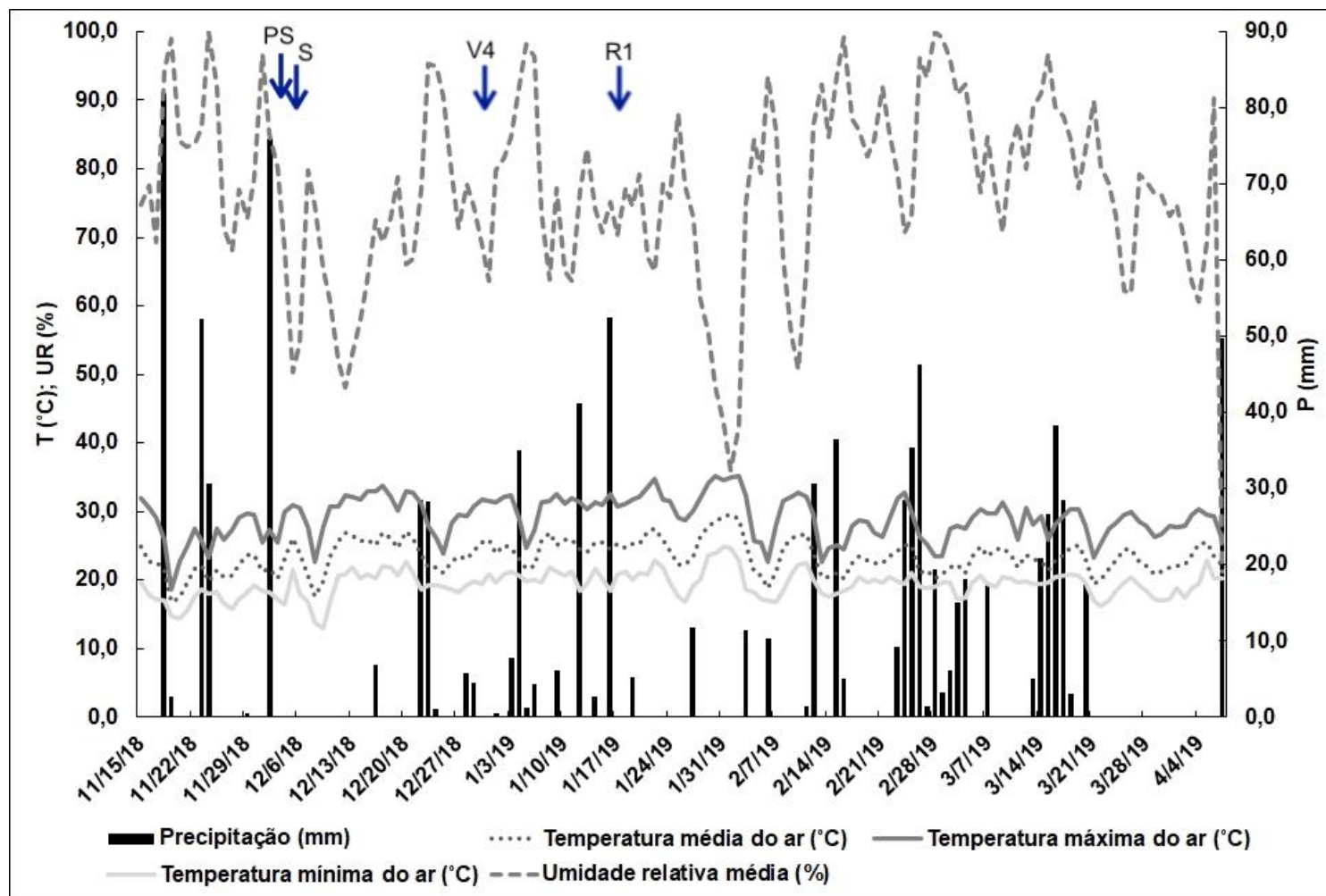
Lana *et al.* (2002), estudando os efeitos do parcelamento do K em três épocas de aplicação (plantio, cobertura e floração) na cultura da soja constataram que a aplicação de 100% da adubação potássica na floração aumentou significativamente o número de vagens por planta e de sementes por planta, além de resultar em menor número de lóculos vazios.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização do local do ensaio

O ensaio foi conduzido em condições de campo na Fazenda Experimental Lageado, pertencente à Faculdade de Ciências Agronômicas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (FCA/UNESP), em Botucatu-SP (22°50'01.36" S, 48°25'30.10" W e 786 m acima do nível do mar), entre os meses de novembro de 2018 e abril de 2019. O clima do local é classificado como Cfa, temperado quente (mesotérmico) úmido, segundo Köppen. Dados obtidos da estação meteorológica instalada a 300 m do local indicam valores médios de temperaturas máximas e mínimas durante a condução do experimento de 29,6 e 19,7°C, respectivamente, e precipitação acumulada de 680 mm. Os dados meteorológicos do período experimental encontram-se na Figura 1.

Figura 1 – Dados meteorológicos de temperatura (T), umidade relativa do ar (UR) e precipitação (P) na área experimental entre novembro de 2018 e abril de 2019, Botucatu, SP



*As setas correspondem ao momento dos estádios fenológicos em que foram aplicados os tratamentos.

O solo da área experimental é um Latossolo Vermelho ácrico de textura média. Para determinação de suas características físico-químicas iniciais, antes do início do preparo do solo, amostra composta foi coletada do local, na profundidade 0-20 cm, e encaminhada ao laboratório do Departamento de Solos e Recursos Ambientais da FCA/UNESP. Os valores encontrados estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Características físico-químicas iniciais do solo

pH	M.O.	P _{resina}	Al ³⁺	H+Al	K	Ca	Mg	SB	CTC
CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	----- mmol _c dm ⁻³ -----						
4,6	15	23	5	28	0,4	9	4	14	42
V%	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Areia	Argila	Silte
			----- mg dm ⁻³ -----				----- g kg ⁻¹ -----		
33	3	0,28	1,8	36	1,5	0,2	740	199	61

Foram semeadas, no dia 04/12/2018, em sistema de preparo convencional do solo, 15 sementes por metro linear da cultivar de soja TMG 7062 IPRO, de crescimento semideterminado, grupo de maturação relativa 6.2 e exigência em fertilidade média-alta, com espaçamento de 0,5 m entre linhas. O preparo do solo consistiu-se em uma gradagem pesada, escarificação, aplicação de 2.000 kg ha⁻¹ de calcário calcítico e uma gradagem leve. As sementes foram tratadas com os fungicidas Carboxina (50 g i.a. kg⁻¹ de sementes), Tiram (50 g i.a. kg⁻¹ de sementes) e inseticida Tiametoxam (105 g i.a. kg⁻¹ de sementes) e inoculadas com *Bradyrhizobium japonicum*, SEMIAS 5079 e 5080, com 6 x 10⁹ ufc/mL (6,0 mL kg⁻¹ de sementes). A adubação de base correspondeu a 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅ na forma de superfostato simples aplicado no sulco de semeadura.

3.2 Tratamentos

Os tratamentos consistiram no parcelamento da adubação potássica entre as épocas pré-semeadura (PS), semeadura (S), e os estádios fenológicos V4 e R1, segundo Fehr e Caviness (1977). Todos os tratamentos, exceto o controle T1,

receberam a dose de 90 kg ha⁻¹ de K₂O na forma de cloreto de potássio (KCl), parcelada conforme a Tabela 2.

Tabela 2 – Parcelamento da adubação potássica nas épocas pré-semeadura (PS), semeadura (S), V4 e R1

Tratamento	% K ₂ O			
	PS	S	V4	R1
T1	0	0	0	0
T2	100	0	0	0
T3	0	100	0	0
T4	0	0	100	0
T5	0	0	0	100
T6	75	0	25	0
T7	75	0	0	25
T8	25	0	75	0
T9	25	0	0	75
T10	0	75	25	0
T11	0	75	0	25
T12	0	25	75	0
T13	0	25	0	75

As aplicações em PS foram realizadas cinco dias antes da semeadura, manualmente, a lanço em área total das parcelas e sem incorporação. No dia da semeadura, antes da mesma, a área foi sulcada com espaçamento 0,5 m, e as aplicações na S foram realizadas manualmente dentro dos sulcos ainda abertos. Logo em seguida realizou-se semeadura mecânica sobre os sulcos. As aplicações em V4 ocorreram 25 dias após a semeadura (DAS), em 29/12/2018, sendo o KCl aplicado de maneira manual, a cerca de 5 cm da fileira de plantas, em apenas um dos lados. Da mesma forma, as aplicações em R1 foram realizadas 45 DAS, em 18/01/2019.

3.3 Delineamento experimental

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com quatro repetições e 13 tratamentos. Cada unidade experimental constituiu-se de uma parcela com sete linhas espaçadas 0,5 m entre si e 10 m de comprimento.

3.4 Avaliações

3.4.1 Condutividade elétrica, umidade e temperatura do solo

A condutividade elétrica (CE), a umidade (h) e a temperatura (T) do solo foram amostradas um dia antes do tratamento PS (denominado ponto zero), dois dias após a semeadura (DAS) e nos estádios V1, V6/V7, R2 e R7. As leituras foram obtidas com auxílio de um sensor capacitivo (Meter Group Inc., GS3, Pullman, WA, EUA) acoplado a um *data logger* (Decagon Devices Inc., ProCheck, Pullman, WA, EUA). Foi amostrado um ponto por parcela, com o sensor inserido diretamente no solo, na linha de plantio, a 5,0 cm de profundidade.

O ponto zero foi estabelecido como área homogênea devido a nenhuma aplicação de tratamentos, portanto foram realizadas quatro avaliações.

3.4.2 Pigmentos cloroplastídicos

Os teores de clorofila *a* (Cla), clorofila *b* (Clb) e carotenoides (CAR) foram determinados nos estádios fenológicos V4, R1 e R5. Para tanto, retirou-se um disco foliar de 1,1 cm de diâmetro do folíolo central do segundo trifólio completamente expandido a partir do ápice de uma planta por parcela, que foi mantido em 2 mL de N-dimetilformamida (DMF) por 24 h em recipiente escuro. Em seguida, utilizou-se 1 mL do extrato diluído em 1 mL de água deionizada para leitura das absorbâncias nos comprimentos de onda 664 nm para Cla, 647 nm para Clb e 480 nm para CAR, no espectrofotômetro (Shimadzu, UV-2700, Kyoto, Japão). Os cálculos das concentrações

de *Cl_a*, *Cl_b*, clorofila total (*Cl_{a+b}*), relação *Cl_a/b* e CAR foram realizados segundo Wellburn (1994).

3.4.3 Índice SPAD

Uma estimativa indireta do conteúdo de clorofilas foi realizada através do índice SPAD, utilizando-se um clorofilômetro portátil (Konica Minolta Corporation, SPAD-502, Osaka, Japão). Em V4, R1 e R5 foram obtidas as médias de 10 leituras por parcela, realizadas em cinco plantas, no segundo trifólio completamente expandido a partir do ápice.

3.4.4 Trocas gasosas

Utilizando-se um analisador de gases a infravermelho (IRGA) (LI-COR Biosciences Inc., LI-6400, Lincoln, NE, EUA), as variáveis taxa de assimilação líquida de CO₂ (*A*), condutância estomática (*g_s*), concentração interna de carbono (*C_i*) e taxa transpiratória (*E*) foram obtidas nos estádios V4, R1 e R5. As leituras ocorreram no período da manhã, entre 8 h e 12 h, utilizando-se radiação fotossinteticamente ativa (PAR) constante, de 1.000 $\mu\text{mol f\acute{o}tons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, concentração atmosférica de CO₂, e temperatura e umidade ambientes. Foi amostrada uma planta por parcela, sendo a leitura no folíolo central do segundo trifólio completamente desenvolvido a partir do ápice. Com as variáveis citadas, obteve-se a eficiência do uso da água (EUA) pela razão *A/E* e a eficiência de carboxilação (EC) pela razão *A/C_i*.

3.4.5 Componentes de produção e estimativa de produtividade

Ao final do ciclo foram avaliados altura, número de ramificações por planta, número de vagens chochas, ou seja, vagens sem grãos desenvolvidos, número de vagens com um grão (NV1G), com dois grãos (NV2G), com três grãos (NV3G) e com quatro grãos (NV4G), número total de vagens (NTV), número total de vagens viáveis (NTVV), consideradas as vagens com pelo menos um grão desenvolvido, número de

grãos por planta (NGPP) e massa de 100 grãos (M100) em cinco plantas por parcela. A produtividade foi estimada através da colheita mecânica de 8,0 m centrais de três linhas por parcela. Os grãos foram pesados e tiveram a umidade corrigida para 13%. Em seguida, os valores obtidos foram extrapolados para um hectare.

3.5 Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade ($p < 0,05$), com auxílio do software AgroEstat – Sistema para análise estatística de ensaios agronômicos (Barbosa; Maldonado, 2011).

Além disso, com os dados obtidos neste estudo foi realizada análise de correlação linear de Pearson (Pearson, 1948), que permite estimar o grau de associação linear entre duas variáveis. O coeficiente de correlação (r) foi considerado significativo quando $p < 0,05$. Considerou-se ainda, r relevante quando acima de 0,70 ou abaixo de -0,70. Para estimativas de correlação e visualização gráfica dos coeficientes foram utilizadas funções nativas do software estatístico R Core Team versão 4.0.2 e a biblioteca “ggcorrplot” (Kassambara; Kassambara, 2019).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Condutividade elétrica, umidade e temperatura do solo

Antes da aplicação dos tratamentos de pré-semeadura foram obtidos os valores de condutividade elétrica (CE), umidade e temperatura do solo, que foram $0,061 \pm 0,0015 \text{ dS m}^{-1}$, $0,203 \pm 0,0043 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $28,2 \pm 0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente.

Na Figura 2 estão apresentados os dados de condutividade elétrica, umidade e temperatura coletados aos 2 DAS (a), e nos estádios fenológicos da soja V1 (b), para avaliar os efeitos do fertilizante aplicado em PS e S, V6/V7 (c) para avaliar os efeitos do fertilizante aplicado em V4, R2 (d) para avaliar os efeitos do fertilizante aplicado em R1, e R7 (e) para avaliar os efeitos próximo ao final do ciclo da soja, em função dos tratamentos com parcelamento de potássio.

Foi observada relação entre CE e os tratamentos que consistiram no parcelamento da adubação potássica entre as épocas PS, S, V4 e R1. Além disso, observou-se relação entre CE e a umidade do solo em todos os períodos avaliados, sendo maior a condutividade elétrica quanto maior a umidade do solo.

A condutividade elétrica tem sido utilizada para o monitoramento das características de fertilidade do solo, possibilitando a estratificação de zonas de manejo devido a sua alta correlação com os atributos do solo (Alcântara *et al.*, 2012), principalmente em relação aos atributos determinantes da produtividade, como a disponibilidade hídrica do solo, textura, percentual de matéria orgânica, tamanho e distribuição de poros, grau de salinidade, CTC e concentração de eletrólitos na solução do solo (Lesch *et al.*, 2005).

Aos 2 DAS (Figura 2a) foi observado maior valor de CE no tratamento T2, com média de $0,239 \text{ dS m}^{-1}$, sendo que no mesmo tratamento foi obtido o maior valor de umidade $0,266 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. O menor valor de CE observado foi em T5, com média de $0,038 \text{ dS m}^{-1}$ e umidade de $0,112 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Em relação à temperatura do solo, não foi observada variação em função dos tratamentos e os valores médios obtidos variaram de $28,9$ a $29,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

A salinização do solo está ligada à aplicação excessiva de fertilizantes com alto índice salino, tais como KCl, nitrato de amônia e formulações comerciais (Pedrotti *et al.*, 2015), podendo reduzir as produções agrícolas. O tratamento T2 recebeu 100% da dose de KCl antes da semeadura, o que justifica um elevado valor de CE nesta época de avaliação, devido a presença do sal.

Na avaliação realizada em V1 (Figura 2b) os maiores valores de CE ocorreram nos tratamentos T3 (aplicação total de KCl na S) e T2 (aplicação total de KCl na PS), com 0,207 e 0,141 dS m⁻¹, respectivamente, o que é condizente com a recente aplicação de elevada dose do adubo salino nesses tratamentos. Por outro lado, a menor CE foi observada em T4, 0,040 dS m⁻¹. Já em relação à umidade, notou-se que os tratamentos T3 e T11 proporcionaram os maiores valores (0,236 e 0,201 m³ m⁻³) e o T4, apresentou o menor valor 0,158 m³ m⁻³ durante o período avaliado. A temperatura do solo variou de 29,1 a 29,3 °C.

Em avaliação efetuada em V6/V7 (Figura 2c) as maiores CE foram observadas nos tratamentos T4 (100% em V4) e T10 (75% na S e 25% em V4), com médias de 0,230 e 0,227 dS m⁻¹, enquanto os menores valores foram obtidos em T1 e T5, com 0,030 e 0,020 dS m⁻¹ respectivamente. Em relação à umidade, os maiores valores também foram obtidos em T4 e T10, ambos com 0,272 m³ m⁻³, e os menores em T1 e T5, com 0,159 e 0,149 m³ m⁻³, respectivamente. Não foi observada variação da temperatura do solo em função dos tratamentos e a média obtida foi de 31,7 °C.

Na avaliação em R2 (Figura 2d) destacam-se os tratamentos T5 e T13 com os maiores valores de CE (0,190 e 0,187 dS m⁻¹ respectivamente), enquanto os menores valores foram obtidos nos tratamentos T1 e T10 com 0,024 e 0,09 dS m⁻¹. Em relação à umidade de solo, os tratamentos com maiores valores foram T5, com 0,239 m³ m⁻³ e T13, com 0,230 m³ m⁻³. Os menores valores de umidade foram ocorreram em T1 e T10 com 0,158 e 0,144 m³ m⁻³. A temperatura do solo apresentou média de 34,5 °C entre os tratamentos.

Já na avaliação em R7 (Figura 2e) as maiores CE ocorreram nos tratamentos T5 e T13, com médias de 0,059 e 0,066 dS m⁻¹. O menor valor foi obtido no tratamento T12, com 0,021 dS m⁻¹. Os mesmos tratamentos T5 e T13 foram os que promoveram os maiores valores de umidade do solo (0,265 e 0,268 m³ m⁻³) e o menor valor ocorreu

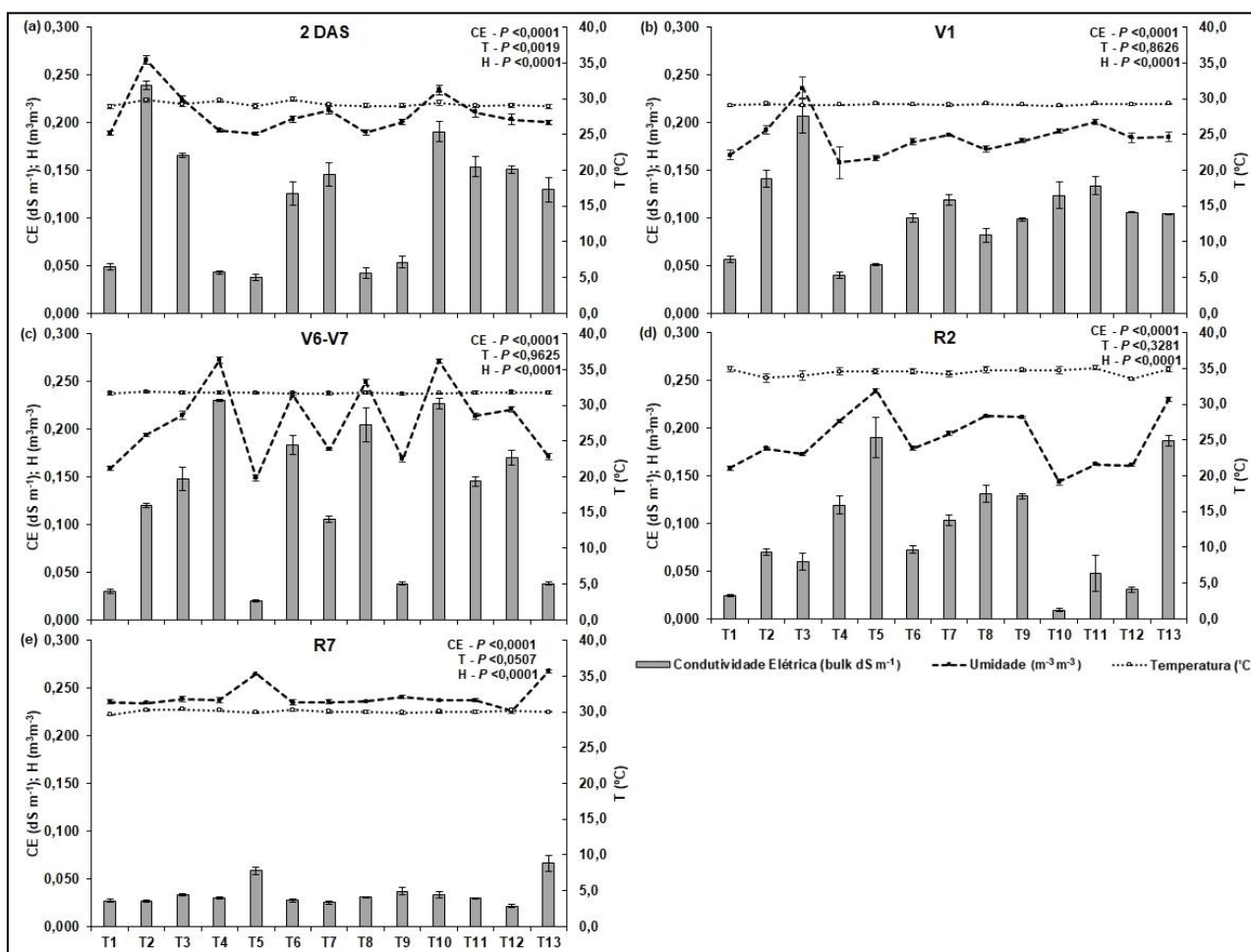
no T12, com $0,226 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Da mesma forma descrita para as demais épocas de avaliação, observou-se que existe uma relação direta entre a CE e a umidade. A temperatura média do solo entre os tratamentos foi $30,1^\circ\text{C}$.

De forma geral, houve relação entre os tratamentos e os parâmetros avaliados, sendo que os maiores valores de CE foram observados nos tratamentos que haviam recebido toda a quantidade ou parte da adubação próximo à data da avaliação. Observou-se também que a CE e a umidade do solo foram diretamente proporcionais. Com exceção do período de desenvolvimento inicial da cultura, o qual permaneceu sem chuvas por 13 dias, houve precipitação bem distribuída ao longo do ciclo do ensaio. Sendo assim, o solo durante o período experimental estava úmido e as maiores umidades observadas nos tratamentos que apresentaram maiores CE têm relação direta com o teor salino proporcionado pelas aplicações de KCl.

Silva *et al.* (2001), em trabalho realizado com a cultura do pimentão em ambiente protegido, verificaram que maiores condutividades elétricas estavam relacionadas a níveis mais elevados de cloreto potássio aplicado, o que evidencia o efeito salino do fertilizante.

Figura 2 – Condutividade elétrica (CE), umidade (h) e temperatura (T) do solo coletados aos 2 dias após a semeadura (DAS), e nos estádios fenológicos da soja V1, V6/V7, R2 e R7 em função dos tratamentos com parcelamento de potássio.

(Cada barra indica o valor médio de quatro repetições $\pm$ erro padrão)



4.2 Pigmentos cloroplastídicos

Os pigmentos presentes nos cloroplastos são essenciais para a fotossíntese das plantas. A captação de energia luminosa ocorre nas folhas, e a transformação em energia química se dá nos cloroplastos, onde estão presentes os pigmentos clorofilas *a* e *b*, que absorvem a energia luminosa e a transfere aos centros de reação dos fotossistemas, ao passo que os carotenoides atuam como filtro, absorvendo o excesso de energia luminosa e evitando a foto-oxidação (Meschede *et al.*, 2011).

Houve efeito significativo entre as épocas de parcelamento de K e os conteúdos de todos os pigmentos cloroplastídicos (Cla, Clb e CAR) nos estádios fenológicos avaliados (Figura 3). Os tratamentos T2 e T12 promoveram maiores valores de Cla nos estádios fenológicos V4 e R1 (28,2 e 26,9 $\mu\text{g cm}^{-2}$, respectivamente), enquanto no estágio R5 os maiores valores do pigmento foram observados no tratamento T2 (30,3 $\mu\text{g cm}^{-2}$), seguido por T3 (28,4 $\mu\text{g cm}^{-2}$), T4 (27,7 $\mu\text{g cm}^{-2}$) e T12 (28,3 $\mu\text{g cm}^{-2}$) (Figura 3a). Por outro lado, os menores conteúdos de Cla foram observados nos tratamentos T1 e T5 em todos os estádios fenológicos avaliados, isto é 21,3 e 20,1 $\mu\text{g cm}^{-2}$ em V4, 14,7 e 14,6 $\mu\text{g cm}^{-2}$ em R1 e 17,5 e 22,6 $\mu\text{g cm}^{-2}$ em R5, respectivamente.

Os maiores conteúdos de Clb no estágio V4 foram verificados em T2 e T12, ambos com 8,9 $\mu\text{g cm}^{-2}$ (Figura 3b). Em R1, os mesmos tratamentos T2 e T12 apresentaram maiores teores do pigmento, 6,0 e 5,8 $\mu\text{g cm}^{-2}$, respectivamente. Em R5, os maiores valores foram constatados nos tratamentos T2 (9,5 $\mu\text{g cm}^{-2}$), T3 (9,3 $\mu\text{g cm}^{-2}$), T4 (9,5 $\mu\text{g cm}^{-2}$) e T12 (9,0 $\mu\text{g cm}^{-2}$). Contrariamente, os menores conteúdos de Clb foram observados em V4 sob os tratamentos testemunha e T5, ambos com 7,3 $\mu\text{g cm}^{-2}$, em R1 no T5 (4,9 $\mu\text{g cm}^{-2}$) e em R5 na testemunha (6,9 $\mu\text{g cm}^{-2}$).

Quanto aos teores de clorofila total (Cla + Clb), os tratamentos T2 e T12 apresentaram maiores valores nos estádios fenológicos V4 (37,1 e 35,8 $\mu\text{g cm}^{-2}$) e R1 (24,3 e 23,4 $\mu\text{g cm}^{-2}$), enquanto em R5 o tratamento T2 (39,9 $\mu\text{g cm}^{-2}$) foi seguido por T3 (37,7 $\mu\text{g cm}^{-2}$), T4 (37,2 $\mu\text{g cm}^{-2}$) e T12 (37,4 $\mu\text{g cm}^{-2}$) (Figura 3c). A testemunha e o tratamento T5 proporcionaram os menores teores de clorofila total em todos os estádios avaliados, ou seja, 28,6 e 27,4 $\mu\text{g cm}^{-2}$ em V4, 19,6 e 20,0 $\mu\text{g cm}^{-2}$ em R1 e 24,4 e 30,3 $\mu\text{g cm}^{-2}$ em R5, respectivamente.

A relação Cla/b não apresentou diferença significativa entre os tratamentos testados e a testemunha nos estádios fenológicos V4 e R1 (Figura 4a), com valores médios de 2,99 e 2,96 $\mu\text{g cm}^{-2}$ respectivamente. Já no estágio R5 foi observada menor relação Cla/b na testemunha (2,55 $\mu\text{g cm}^{-2}$), enquanto nos demais tratamentos a média foi de 3,04 $\mu\text{g cm}^{-2}$. A menor relação Cla/b observada no tratamento testemunha pode estar relacionada ao não fornecimento de K, o que pode ter resultado em menores teores dos pigmentos cloroplastídicos e também em menor relação Cla/b.

Com relação aos CAR, houve diferença estatística entre os tratamentos e a testemunha em todos os estádios avaliados (Figura 4b). Em V4 os tratamentos T2, T3, T6 e T7 apresentaram maiores teores, 11,5, 11,4, 11,2 e 11,1 $\mu\text{g cm}^{-2}$, respectivamente. Em R1 os maiores valores de CAR foram verificados em T2 e (5,7 $\mu\text{g cm}^{-2}$), T7 (5,7 $\mu\text{g cm}^{-2}$), T10 (5,9 $\mu\text{g cm}^{-2}$) e T12 (5,7 $\mu\text{g cm}^{-2}$), e em R5 o tratamento T2 proporcionou o maior CAR (8,5 $\mu\text{g cm}^{-2}$). Em V4 os menores valores deste pigmento foram observados nos tratamentos testemunha, T5, T12 e T13, que proporcionaram valores entre 8,4 e 9,2 $\mu\text{g cm}^{-2}$. No estádio R1 os menores valores de CAR foram verificados em T1, T5, T9 e T13 com 4,6 a 4,9 $\mu\text{g cm}^{-2}$ e em R5 o menor valor encontrado na testemunha, 5,9 $\mu\text{g cm}^{-2}$. Destaca-se que em todos os estádios fenológicos avaliados a testemunha estava entre os tratamentos com menores teores de CAR, deixando claro que o não fornecimento de K durante a condução da cultura reduziu os teores deste pigmento.

Evidencia-se que a aplicação de todo K em PS (T2) proporcionou os maiores valores de pigmentos cloroplastídicos nos diferentes estádios fenológicos, enquanto a relação *Cl_a/b* manteve-se semelhante entre os tratamentos. A testemunha e o tratamento T5 (aplicação total do KCl em R1) apresentaram os menores teores dos três pigmentos estudados em todas as avaliações.

Conforme Rêgo e Possamai (2004), um dos fatores ligados à eficiência fotossintética de plantas é o conteúdo de clorofila e carotenoides. O conteúdo de clorofila nas folhas é, portanto, frequentemente utilizado para estimar o potencial fotossintético. A maior disponibilidade de K no início do ciclo, representada pelos tratamentos T2 e T12, contribuiu para que os pigmentos cloroplastídicos desses tratamentos se mantivessem mais elevados em relação aos demais durante todo o desenvolvimento das plantas. Por outro lado, a aplicação tardia de K (T5) e o não fornecimento do nutriente (T1) resultaram nos valores mais baixos ao longo do ciclo. Estudo realizado por Sarah *et al.* (2021) com a cultura do milho apontou que a deficiência de K reduziu o teor de pigmentos fotossintéticos e de carotenoides, a taxa assimilação líquida de CO₂, elevou a taxa transpiratória e, conseqüentemente, reduziu o conteúdo relativo de água e a eficiência do uso da água em relação às plantas devidamente nutridas com o nutriente.

A disponibilidade de K impulsiona o aproveitamento de N, nutriente esse que é componente de enzimas associadas a cloroplastos e que participam da síntese de moléculas da clorofila (Viana; Kiehl, 2010). Sabe-se que o período de maior demanda pela cultura da soja ocorre na fase de crescimento vegetativo, aos 30 dias que antecedem o florescimento (Tanaka *et al.*, 1993). Sendo assim, plantas que estavam bem nutridas em K durante o período de maior necessidade apresentaram os maiores teores de pigmentos cloroplastídicos em relação aos demais tratamentos.

Figura 3 – Teores de clorofila *a* (Cl*a*), clorofila *b* (Cl*b*) e clorofila total (Cl*a*+*b*) nos estádios V4, R1 e R5 da soja em função do parcelamento da dose de potássio. [Médias dentro de cada fase fenológica seguidas de letras distintas diferem estatisticamente pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). Cada barra indica o valor médio de quatro repetições $\pm$ erro padrão]

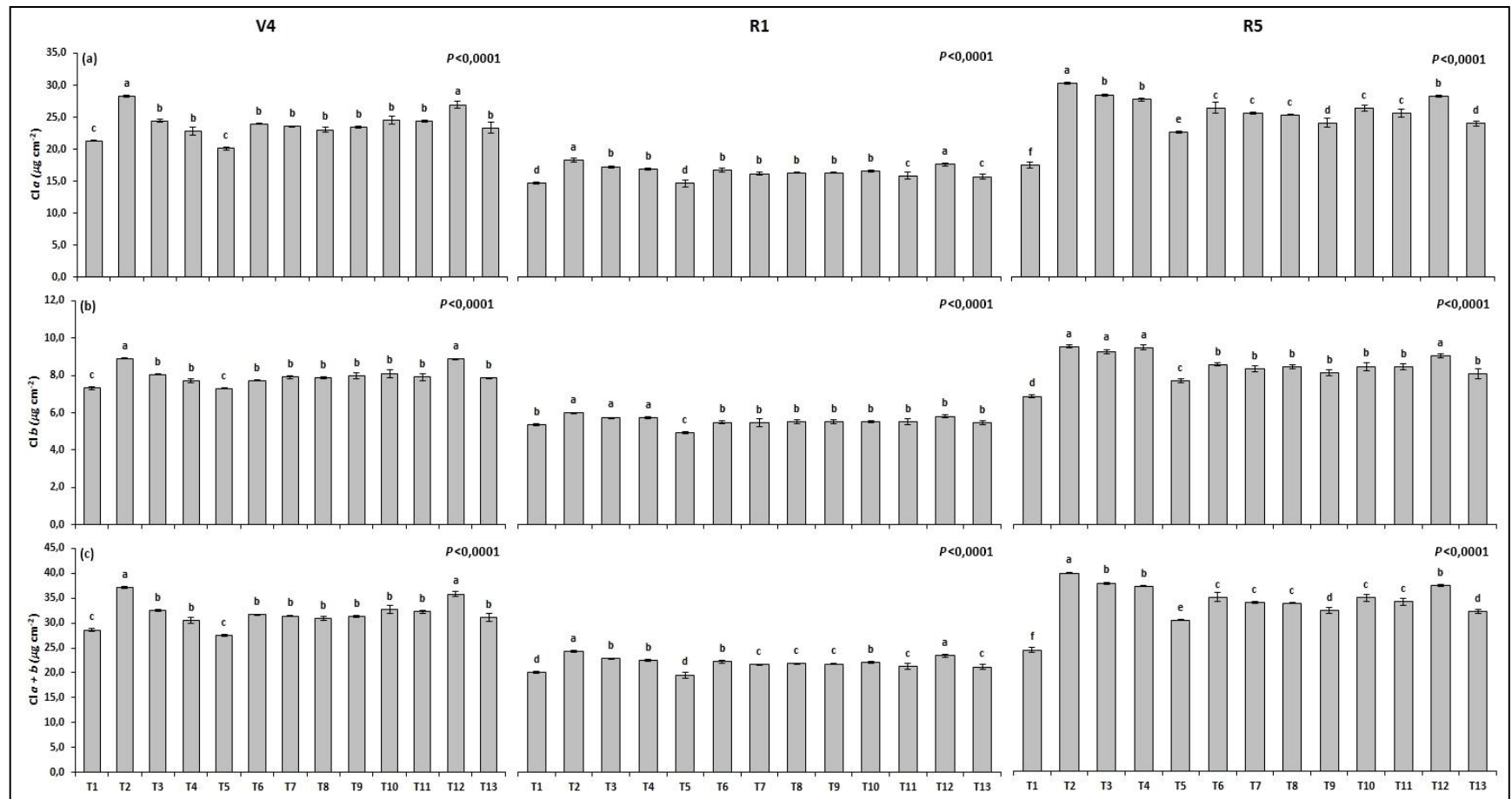
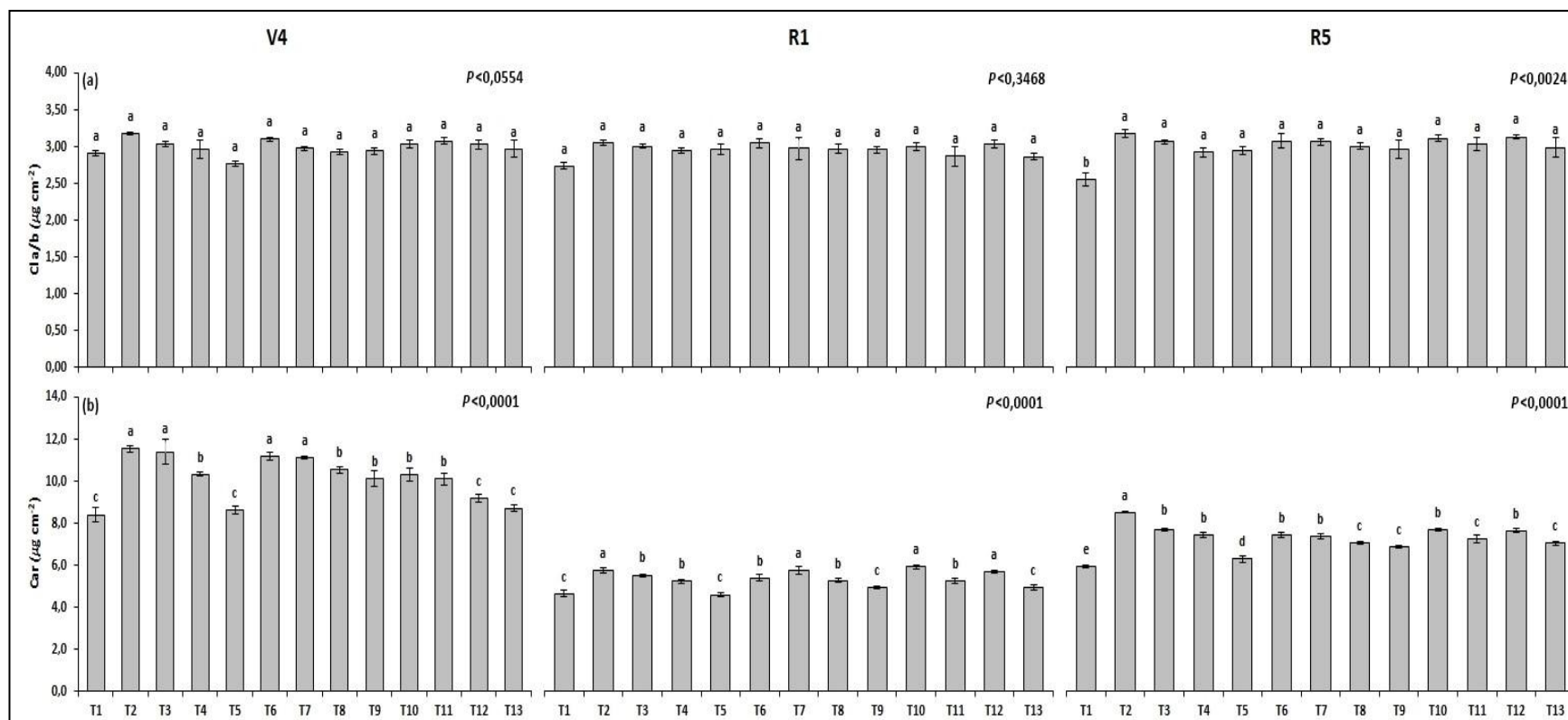


Figura 4 – Relação clorofilas a/b (Cl a/b) e teores de carotenoides (CAR) nos estádios V4, R1 e R5 da soja em função do parcelamento da dose de potássio. [Médias dentro de cada fase fenológica seguidas de letras distintas diferem estatisticamente pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). Cada barra indica o valor médio de quatro repetições $\pm$ erro padrão]



4.3 Índice SPAD

O índice SPAD (*Soil Plant Analysis Development*) é um parâmetro que se correlaciona fortemente com o teor de clorofila. O SPAD mensura, como índice de concentração de clorofila, o delta de luz transmitida na folha por meio de dois sensores presentes no aparelho nos comprimentos de 650 μm e 940 μm (Waskom *et al.*, 1996). A luz transmitida no comprimento de 650 μm (luz vermelha) está relacionada às clorofilas *a* e *b* (645 μm e 663 μm , respectivamente), e essa não sofre influência dos carotenoides. E a luz transmitida no comprimento de 940 μm (infravermelho próximo) serve como medida de calibração interna para as condições de umidade e espessura de folha (Waskom *et al.*, 1996). Portanto, é eficaz para estimar o teor relativo de clorofila presente nas plantas (Sant'ana *et al.*, 2010).

Houve diferença estatística no índice SPAD entre os tratamentos com diferentes épocas de aplicação do potássio em todos os estádios de desenvolvimento avaliados.

No estádio V4, os valores de índice SPAD nos tratamentos T3 (aplicação total de KCl na S) e T7 (KCl aplicado 75% na PS e 25% em R1) foram superiores aos demais tratamentos, resultando em valores de unidade SPAD de 46,2 e 45,9 respectivamente (Figura 5). Já os tratamentos T1, T4, T5, T8, T9 e T12 proporcionaram os menores índices, que variaram de 43,6 a 44,7.

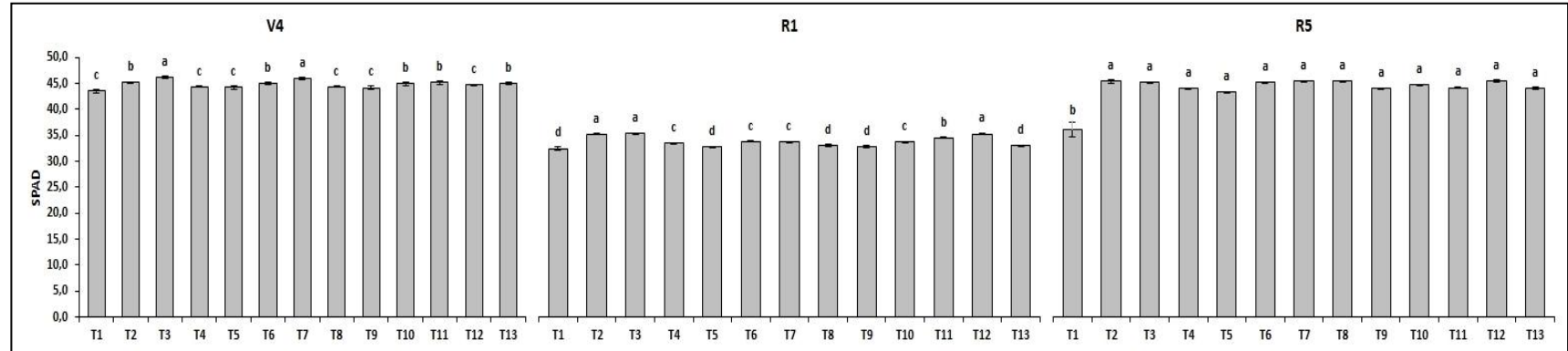
Em R1, os tratamentos T2 (aplicação total de KCl na PS), T3 (aplicação total de KCl na S) e T12 (KCl aplicado 25% na S e 75% na fase V4) proporcionaram os maiores valores de índice SPAD, 35,2; 35,4 e 35,3 respectivamente (Figura 5). Por outro lado, os menores índices SPAD foram observados nos tratamentos T1, T5, T8, T9 e T13, com valores entre 32,5 e 33 unidades SPAD.

Na avaliação do estádio R5 houve diferença entre a testemunha sem adubação (T1), que apresentou o menor valor para o índice SPAD, 36,2, e os demais tratamentos, que não diferiram entre si, proporcionando valores entre 43,4 e 45,5 (Figura 5). Portanto, os tratamentos com diferentes épocas de aplicação de KCl no solo não afetaram o índice SPAD na fase de enchimento de grãos.

Observou-se que na avaliação realizada no estágio fenológico V4 o tratamento T3 (aplicação total de KCl na S) apresentou maior valor de índice SPAD, o que pode ter ocorrido devido a maior proximidade em dias da adubação na semeadura com KCl, que aconteceu 25 dias antes da avaliação em V4. Em R1, além de T3 sobressaíram-se também T12 (KCl aplicado 25% na S e 75% na fase V4) e T2 (aplicação total de KCl na PS), tratamentos que tiveram a maior parte ou a totalidade do K fornecido desde o início do ciclo. Assim como observado para os teores de pigmentos cloroplastídicos, o índice SPAD também foi maior em plantas bem nutridas em K no início de seu desenvolvimento.

Com relação aos menores valores de índice SPAD, de forma geral ocorreram quando não houve aplicação de potássio (T1), o que demonstra que na ausência do nutriente as plantas possuem menor teor de clorofila e concentração de N.

Em estudo conduzido por Yokoyama *et al.* (2018), que trabalharam com diferentes densidades de semeadura da soja, os autores verificou-se que elevados valores de índice SPAD estão relacionados à maior idade da planta, principalmente no período de enchimento de grãos, sendo índices de 35 a 40 considerados altos. Neste estudo, apesar de os índices terem se mantido elevados durante todo o ciclo, valores mais altos foram observados também no período de desenvolvimento vegetativo (V4), além da fase de enchimento de grãos. O mesmo ocorreu para os teores de pigmentos cloroplastídicos, evidenciando a relação entre as clorofilas e o índice SPAD.



4.4 Trocas gasosas

A taxa de assimilação líquida de CO_2 (A) foi afetada pelos tratamentos de parcelamento de K nos três estádios fenológicos avaliados (Figura 6a). Em V4 o tratamento T2 apresentou maior valor, com $31,2 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Em R1 os maiores valores de A foram verificados em T2 e T12, com $43,9$ e $43,8 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectivamente, e na fase R5 nos tratamentos T2, T10 e T12, com $20,2$, $20,4$ e $19,8 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectivamente. A taxa de assimilação líquida de CO_2 representa a fotossíntese realizada pelas plantas, e o fornecimento do potássio todo na pré-semeadura (T2) pode ter possibilitado maior disponibilização do nutriente no período de maior exigência pela cultura, resultando em maior taxa de assimilação líquida de CO_2 . Jia *et al.* (2008) relataram que a taxa de assimilação líquida de CO_2 de plantas de arroz foi maior quando supridas adequadamente com K em relação às plantas com deficiência. Desse modo, os autores atribuíram esse resultado ao aumento da atividade de carboxilação da enzima ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase oxigenase (Rubisco).

Com relação à condutância estomática (g_s), houve diferenças entre os tratamentos em todos os estádios de avaliação (Figura 6b). Os maiores valores de g_s no estágio fenológico V4 foram obtidos em T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T10, T11 e T12, os quais variaram de $0,53$ a $0,62 \text{ mol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. No estágio R1, os maiores valores foram observados nos tratamentos T2, T3, T4, T6, T10, T11 e T12, variando de $0,55$ a $0,52 \text{ mol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Já em R5, apenas os tratamentos T2 e T12 ocasionaram os maiores valores, com condutância entre $0,41$ e $0,43 \text{ mol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Apesar de g_s ter apresentado diferença estatística entre os tratamentos em todas as fases fenológicas avaliadas, não foi possível determinar uma relação entre g_s e os tratamentos. Porém, observou-se que T2 e T12 apresentaram maiores valores de g_s em todas as avaliações.

Maiores condutâncias estomáticas resultantes da aplicação de potássio de forma total na PS (T2) ou parcelada 25% em S e 75% em V4 (T12) verificadas nesta pesquisa, condizem com resultados obtidos em outros estudos, como no realizado por Catuchi *et al.* (2012), no qual a adubação potássica aumentou a condutância estomática em soja, sendo o K responsável por conferir às plantas adequada dinâmica da regulação da abertura estomática, além de ser um elemento extremamente

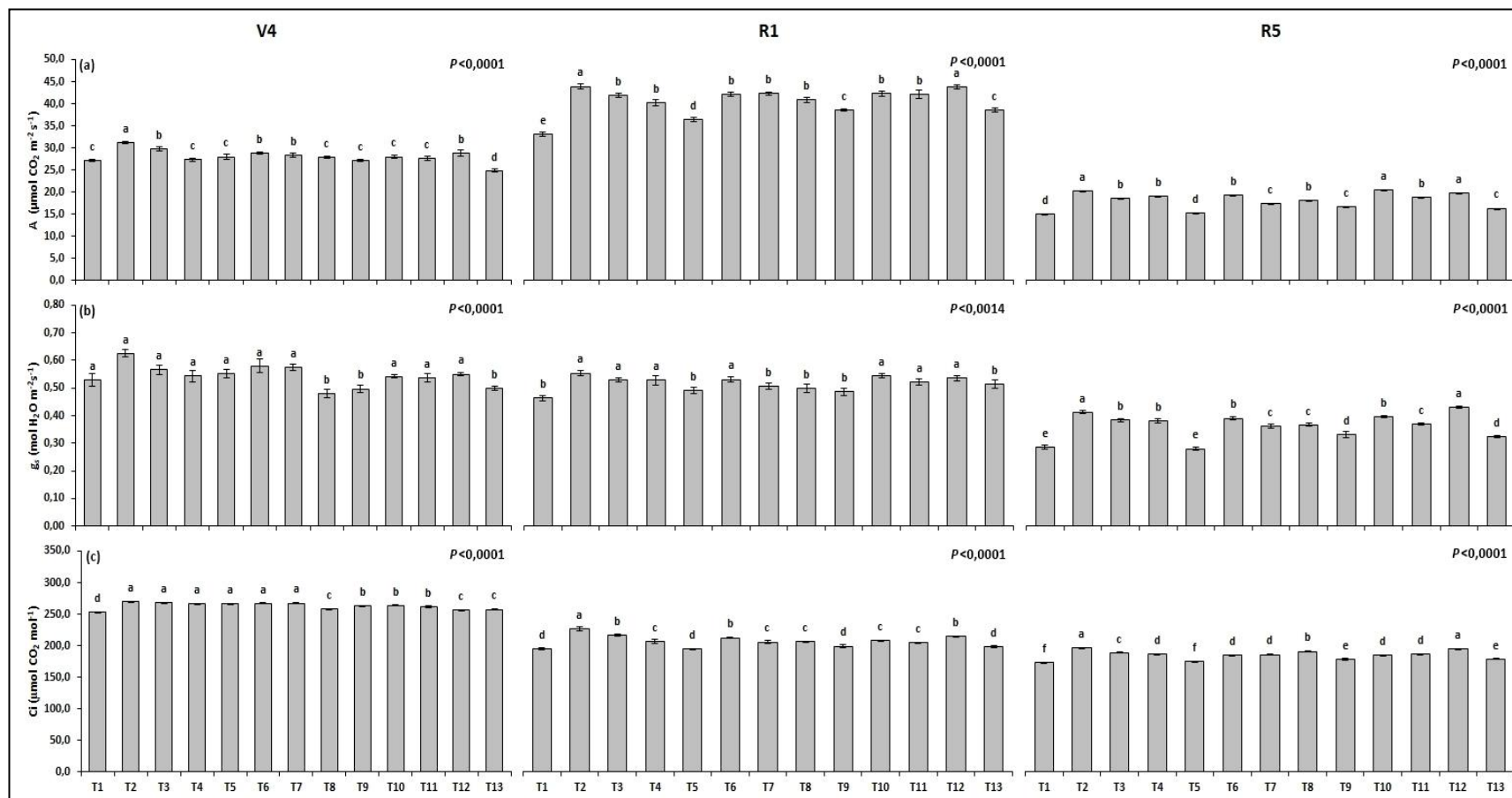
importante na ativação da função carboxilase da Rubisco, contribuindo para maior atividade fotossintética. Conforme Pettigrew (2008), plantas com adequado suprimento de K apresentam maior eficiência no uso da água, uma vez que há menor demanda de água para produção de uma unidade de matéria seca acumulada.

Para a concentração interna de carbono (C_i) também foi observada diferença estatística entre os tratamentos nas épocas de avaliação (Figura 6c). Os maiores valores de C_i observados em V4 ocorreram nos tratamentos T2, T3, T4, T5, T6 e T7, variando de 266,3 a 270,0 $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1}$; enquanto na fase R1 o maior C_i , 226,6 $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1}$, foi verificado no T2, e em R5 os tratamentos T2 e T12 resultaram em 195,9 e 194,7 $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1}$, respectivamente. Os menores valores de C_i foram observados em V4 na testemunha T1 (sem adubação com potássio) com 252,6 $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1}$, em R1 em T1, T5, T9 e T13 com valores de 194,3 a 199,1 $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ e em R5 nos tratamentos T1 e T5 com valores de 172,9 e 174,7 $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1}$. Notou-se que os menores valores de C_i ocorreram na testemunha e nos tratamentos em que a adubação com K foi realizada na maior parte ou totalmente em estágio mais tardio de desenvolvimento (R1). A redução de C_i pode estar relacionada à função de controle osmótico exercido pelo K, que mantém a turgidez das células guardas. A deficiência de potássio pode limitar a fotossíntese pela redução da disponibilidade de substrato com o fechamento estomático (Melo *et al.*, 2009).

De acordo com Gondim *et al.* (2015), a taxa de assimilação líquida do CO_2 , a taxa transpiratória, a condutância estomática e a concentração intercelular de CO_2 servem como indicadores de mudanças na fisiologia das plantas sob condições adversas como baixa e/ou elevada concentração de nutrientes.

Para a taxa transpiratória (E), observou-se que no estágio V4 os tratamentos T2 e T11 apresentaram maiores valores, 12,4 e 12,8 $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ respectivamente (Figura 7a). Em R1 os tratamentos T2, T10, T11 e T12 foram superiores, com valores entre 9,3 a 9,9 $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, e em R5 as maiores médias ocorreram em T2 e T12, com valor de 9,2 $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para ambos.

Figura 6 – Taxa de assimilação líquida de CO₂ (A), condutância estomática (gs) e concentração interna de CO₂ (Ci) nos estádios V4, R1 e R5 da soja em função do parcelamento da dose de potássio. [Médias dentro de cada fase fenológica seguidas de letras distintas diferem estatisticamente pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). Cada barra indica o valor médio de quatro repetições $\pm$ erro padrão]



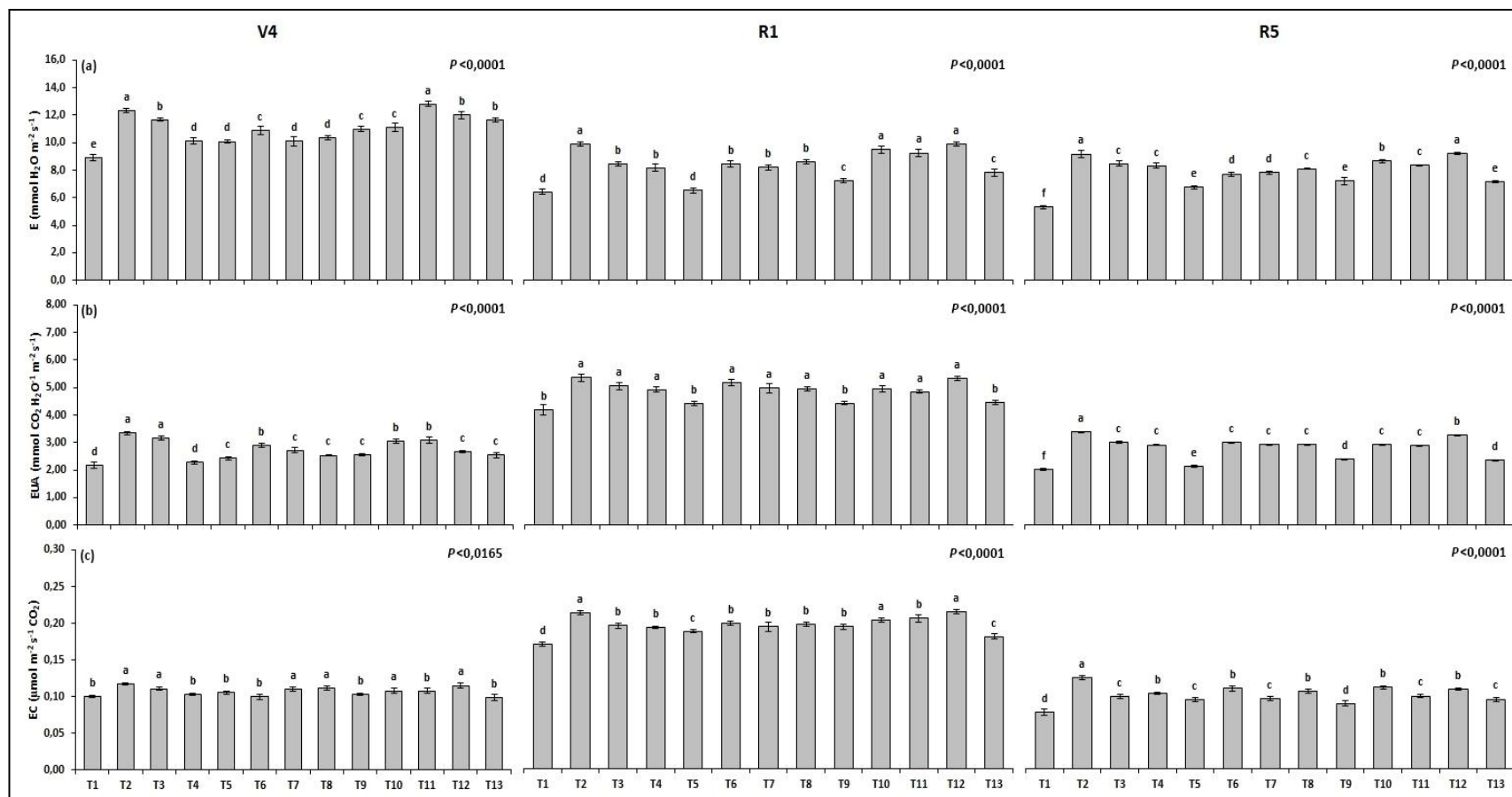
Com relação à eficiência do uso da água (EUA), os maiores valores observados em V4 correspondem aos tratamentos T2 e T3, com 3,33 e 3,16 mmol CO₂ H₂O⁻¹ m⁻² s⁻¹, respectivamente (Figura 7b). No estágio R1 os tratamentos T2, T3, T4, T6, T7, T8, T10, T11 e T12 proporcionaram os maiores valores, que variaram de 4,85 a 5,36 mmol CO₂ H₂O⁻¹ m⁻² s⁻¹. Já em R5 a maior EUA foi verificada em T2 com 3,38 mmol CO₂ H₂O⁻¹ m⁻² s⁻¹.

Os maiores valores de eficiência de carboxilação (EC) observados em V4 ocorreram nos tratamentos T2, T3, T7, T8, T10 e T12 variando de 0,11 a 0,12 μmol m⁻² s⁻¹ CO₂ (Figura 7c). Em R1 as maiores médias foram obtidas em T2, T10 e T12 com valores entre 0,20 e 0,21 μmol m⁻² s⁻¹ CO₂. No estágio R5 o tratamento com maior EC foi T2, com 0,12 μmol m⁻² s⁻¹ CO₂.

O posicionamento da dose total (90 kg ha⁻¹) de K₂O em PS (T2) proporcionou os maiores valores para *E*, EUA e EC em todos os estádios avaliados. Zain e Ismail (2016), estudando o efeito de doses de adubação potássica na cultura do arroz concluíram que conforme as doses foram aumentadas de 80 até 160 kg ha⁻¹, *E* e EUA também apresentaram maiores valores, o que favoreceu a absorção de nutrientes, o controle mais eficiente da pressão de turgor e um melhor ajuste osmótico nas plantas bem nutridas em K, resultando em maiores produtividades.

O K apresenta importante papel na manutenção do turgor dos tecidos vegetais, no controle estomático e na transpiração, sendo estes essenciais para aumentar a eficiência de uso da água pelas culturas (Serafim *et al.*, 2012; Tränkner; Tavakol; Jáklí, 2018). Desse modo, plantas de soja com suprimento adequado de K apresentam maior eficiência no uso da água, demandando menor quantidade de água para produzir uma unidade de massa seca quanto maior o suprimento do nutriente (Nelson, 2005). De maneira geral, os resultados desta pesquisa demonstram que tanto o tratamento de aplicação de potássio de forma total na PS (T2) quanto parcelada 25% em S e 75% em V4 (T12) promoveram maior eficiência nas variáveis fisiológicas da soja.

Figura 7 – Taxa transpiratória (E), eficiência do uso da água (EUA) e a eficiência da carboxilação (EC) nos estádios V4, R1 e R5 da soja em função do parcelamento da dose de potássio. [Médias dentro de cada fase fenológica seguidas de letras distintas diferem estatisticamente pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). Cada barra indica o valor médio de quatro repetições $\pm$ erro padrão]



4.5 Componentes de produção e estimativa de produtividade

Para a altura de plantas, os tratamentos T1, T3, T4, T6, T7, T9, T10, T11 e T13 proporcionaram os maiores valores, entre 76,8 e 77,7 cm, em relação aos tratamentos T2, T5, T8 e T12, que tiveram altura de plantas entre 75,7 e 76,2 cm (Figura 8a). Uchôa *et al.* (2018), em trabalho com parcelamento da adubação potássica em soja, obtiveram os melhores resultados de altura de plantas quando aplicaram no plantio (60 kg ha^{-1} de K_2O) e fizeram duas coberturas aos 20 e 35 DAE.

Chen *et al.* (2016), em trabalho realizado com a cultura do de sorgo em condição de deficiência de K, observaram que as plantas tiveram seu crescimento significativamente afetado após 15 dias sem aplicação de potássio, o que demonstra que a ausência do nutriente leva à redução do crescimento das plantas. Embora os tratamentos tenham resultado em diferenças na altura das plantas, destaca-se que estão dentro do desejável para a cultura da soja, conforme Sediyaama (2009), que afirma que para uma colheita mais eficiente é importante que as plantas de soja tenham em torno de 70 a 80 cm.

Com relação ao número de ramificações, ocorreu diferença estatística entre os tratamentos, sendo que T2, T10 e T12 proporcionaram os maiores valores, entre 5,6 e 6,0 (Figura 8b). As plantas dos tratamentos T2 e T12, apesar de possuírem menor porte, foram superiores quanto ao número de ramificações, refletindo em melhor estruturação da planta, o que pode representar maior número de pontos de inserção de estruturas reprodutivas.

Na variável vagens chochas foi observada diferença estatística, sendo que os tratamentos T1, T4 e T5 apresentaram maiores valores, isto é 10,4, 9,3 e 10,1 vagens chochas por planta, respectivamente (Figura 8c). Em contrapartida, T2 e T11 proporcionaram as menores médias (5,5 e 4,6 vagens chochas por planta). O maior número de vagens chochas foi observado nos tratamentos em que a aplicação de K não foi realizada, ou quando realizada foi de forma tardia, o que provavelmente provocou menor desenvolvimento das vagens e grãos. Mascarenhas *et al.* (2004) relataram que plantas de soja com deficiência de K podem apresentar redução número

de vagens “pegas”, aumento no número de vagens chochas e a formação de frutos partenocárpicos.

Quanto aos NV1G, NV2G, NV3G e NV4G, foram observadas diferenças entre os tratamentos. A testemunha T1 apresentou a maior quantidade de vagens com um grão, média de 21,5, por outro lado T11 proporcionou menor média de NV1G (15,1) (Figura 8d). Já para NV2G e NV3G, os tratamentos que apresentaram os maiores valores foram T2 e T12, médias 55,1 e 55,7 para NV2G e de 65,3 e 67,1 para NV3G (Figuras 8e e 8f), respectivamente. Em relação a NV4G, o tratamento T2 resultou em maior valor médio, 1,87 (Figura 9a).

Os tratamentos T2 e T12 resultaram em maiores valores de NTV, NTVV e NGPP. As médias encontradas foram 139,0 e 139,9 vagens por planta (Figura 9b), 144,5 e 145,9 vagens viáveis por planta (Figura 9c) e 330,4 e 333,0 grãos por planta (Figura 9d) respectivamente, o que proporcionou maiores produtividades.

Com relação ao número de vagens com 2 e 3 grãos e quanto ao número de vagens totais, destaca-se que tanto a aplicação de 100% da dose do potássio em PS (T2) quanto a aplicação parcelada com 25% na semeadura e 75% em V4 (T12), proporcionaram os maiores valores destas variáveis, demonstrando que a presença de potássio nas fases de desenvolvimento iniciais da soja possuem relação com o aumento do número de vagens e com o número de vagens com 2 e 3 grãos. Os tratamentos que obtiveram os menores valores para essas variáveis foram aqueles que não receberam adubação com K (T1), ou os que não receberam toda a dose até o estágio fenológico V4. Cavalini *et al.* (2018), estudaram épocas de aplicação de potássio em cobertura na soja e também obtiveram os maiores valores para número de grãos por vagem e número de vagens por planta quando o parcelamento foi realizado com 50% da dose no plantio (superfície a lanço) + 25% da dose 15 dias após o plantio + 25% da dose 30 dias após o plantio, alcançando 42,22 vagens de três grãos planta⁻¹ e 59,10 vagens planta⁻¹. Essa prática, porém, seria inviável para o produtor no campo pelo custo, mão de obra e tempo a ela dispensados.

Com relação à massa de 100 grãos, foi observada diferença estatística entre os tratamentos, sendo T2, T3 e T12 os que proporcionaram maiores valores, entre 21,8 e 21,5 g (Figura 9e). A menor massa de 100 grãos foi obtida na testemunha T1, com valor

de 18,8 g. Resultado semelhante foi encontrado por Júlio *et al.* (2016) que avaliando a época de aplicação de potássio em soja, observaram que quando a adubação potássica foi realizada no sulco de semeadura, obteve-se o maior valor de peso de mil grãos (122,72 g), demonstrando que o fornecimento de K no início do ciclo gera incrementos aos componentes de produção.

Para a produtividade, foi observada diferença estatística entre os tratamentos, e os maiores valores observados nos tratamentos T2 e T12, com médias de 2.823,0 e 2.744,1 kg ha⁻¹, respectivamente (Figura 9f). Contrariamente, a testemunha T1, que não recebeu a adubação potássica, proporcionou a menor produtividade (2.180,9 kg ha⁻¹), assim como os tratamentos T5 (100 % do KCl aplicado em R1) e T9 (KCl aplicado 25% na PS e 75% na fase R1) que proporcionaram produtividades de 2.138,8 e 2.242,6 kg ha⁻¹ respectivamente. Quando a adubação potássica foi realizada na totalidade apenas na fase R1 (T5) ou quando parcelada e aplicada 25% na PS e 75% em R1(T9) houve queda na produtividade, que pode ser atribuída ao fornecimento do potássio de forma tardia, não suprimindo a necessidade deste nutriente durante a fase de maior exigência pelas plantas.

A fase de maior exigência de K na cultura da soja consiste no período de crescimento vegetativo, sendo a velocidade máxima de absorção do nutriente atingida aos trinta dias antes ao florescimento (Tanaka *et al.*, 1993). Corroborando com essa afirmação, Borkert *et al.* (2005) relataram que o período de maior exigência de K pela cultura é durante a fase de maior crescimento vegetativo, estendendo-se até alguns dias antes da floração.

A redução na produtividade na cultura da soja está relacionada ao aumento no número de vagens chochas (Figura 8c), impactando de forma negativa a produção de grãos por unidade de área (Passos *et al.*, 2011).

Em trabalho realizado por Júlio *et al.* (2016), foi demonstrado que houve efeito significativo épocas de aplicação do potássio na cultura da soja, de modo que a adubação com 80 kg ha⁻¹ de K₂O tanto 15 dias antes da semeadura quanto na semeadura contribuíram para maior produtividade da cultura da soja, promovendo produtividades de 3.076,38 kg ha⁻¹ e 3.423,61 kg ha⁻¹ respectivamente. De forma

semelhante, no presente trabalho a maior produtividade foi obtida quando 100% da dose de KCl foi aplicada na PS (T2), com valor de 2.823,0 kg ha⁻¹.

Figura 8 – Altura, nº de ramificações por planta, nº de vagens chochas, número de vagens com um grão (NVG1), número de vagens com dois grãos (NVG2) e número de vagens com três grãos (NVG3), em função do parcelamento ou não da adubação potássica e das suas épocas de aplicação. [Médias seguidas de letras distintas diferem estatisticamente pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). Cada barra indica o valor médio de quatro repetições $\pm$ erro padrão]

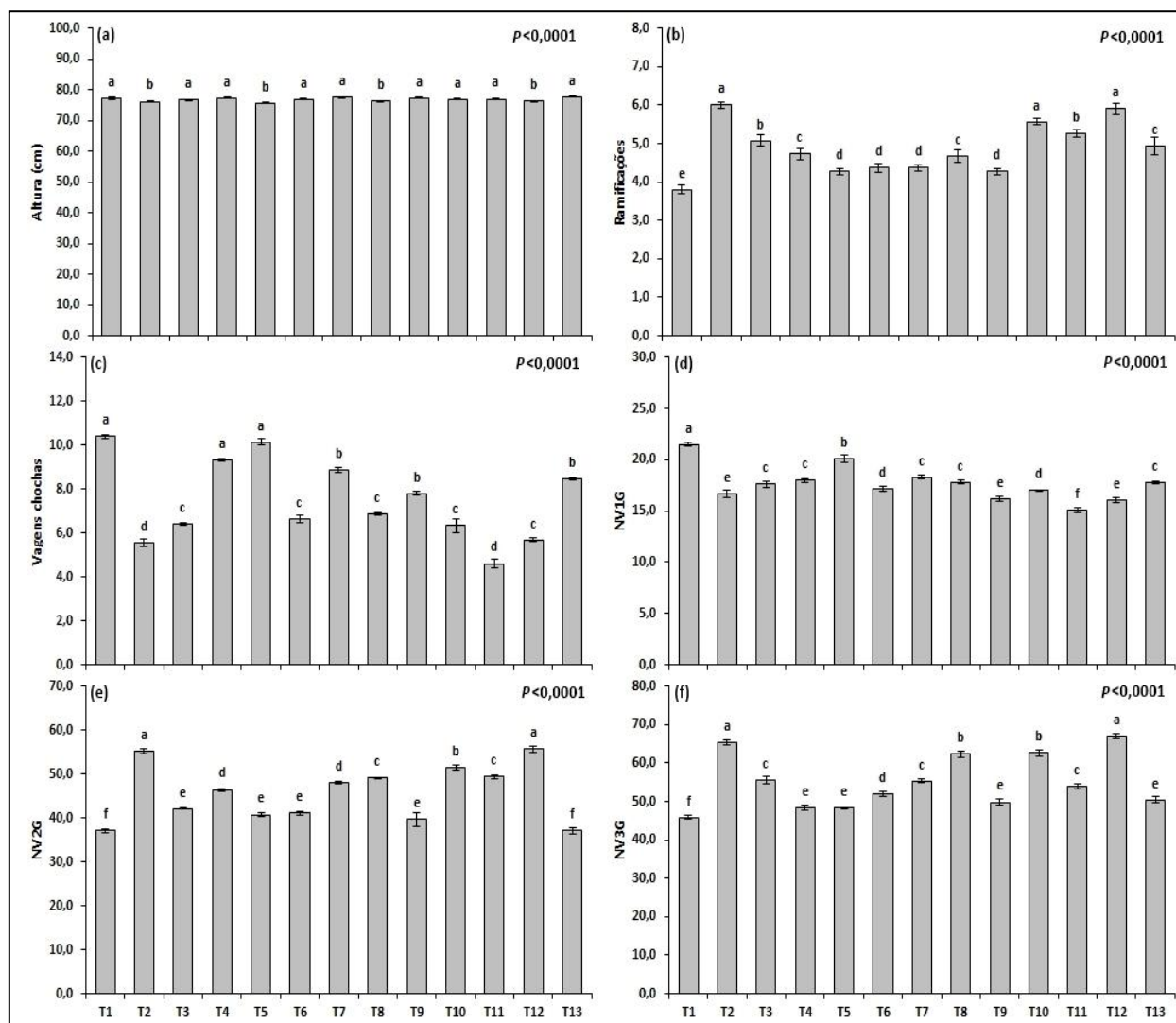
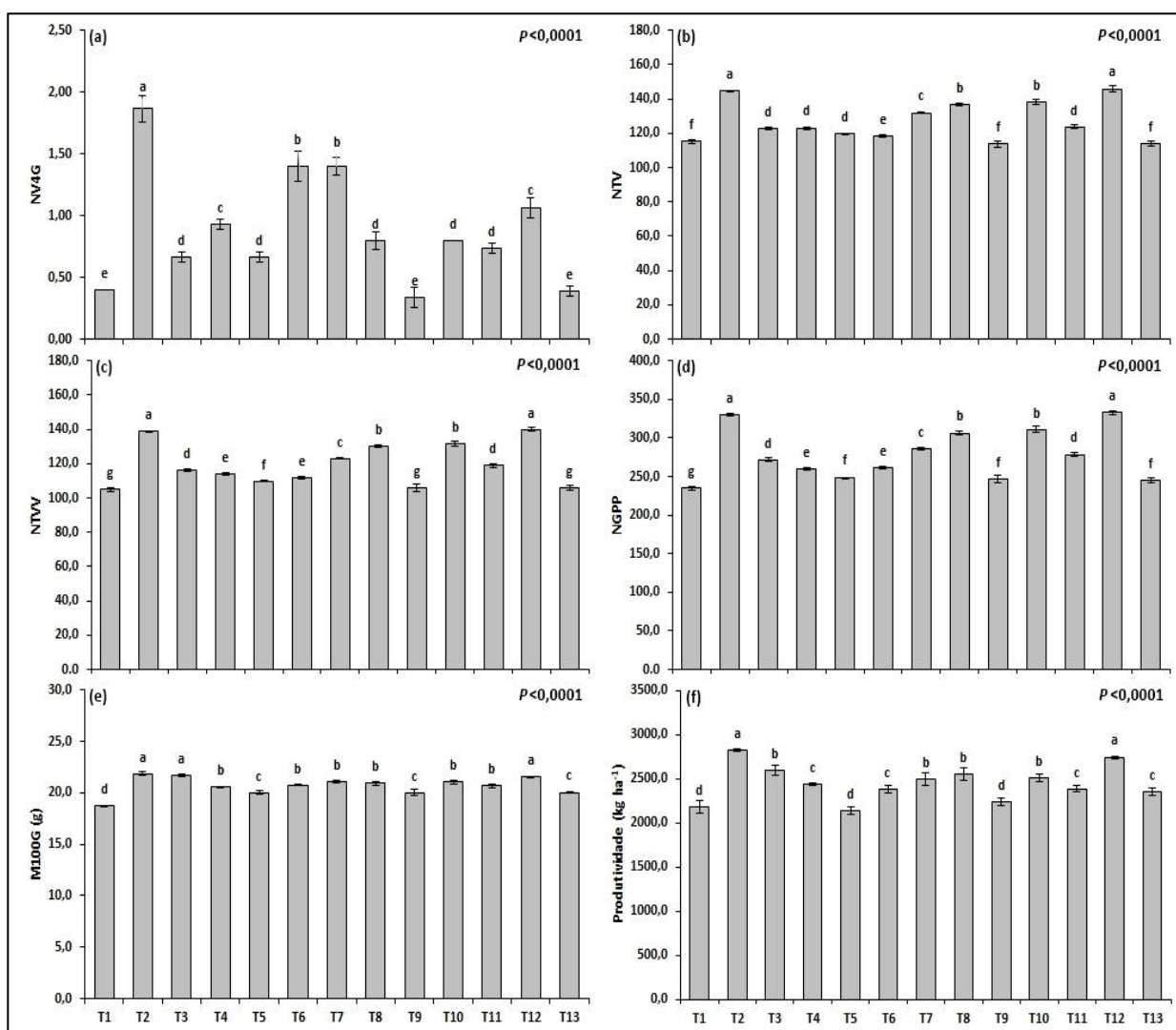


Figura 9 – Número de vagens com quatro grãos (NVG4), número total de vagens (NTV), número total de vagens viáveis (NTVV), número de grãos por planta (NGPP), massa de cem grãos (M100G) e produtividade em função do parcelamento ou não da adubação potássica e das suas épocas de aplicação. [Médias seguidas de letras distintas diferem estatisticamente pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). Cada barra indica o valor médio de quatro repetições $\pm$ erro padrão]



4.6 Correlação linear de Pearson

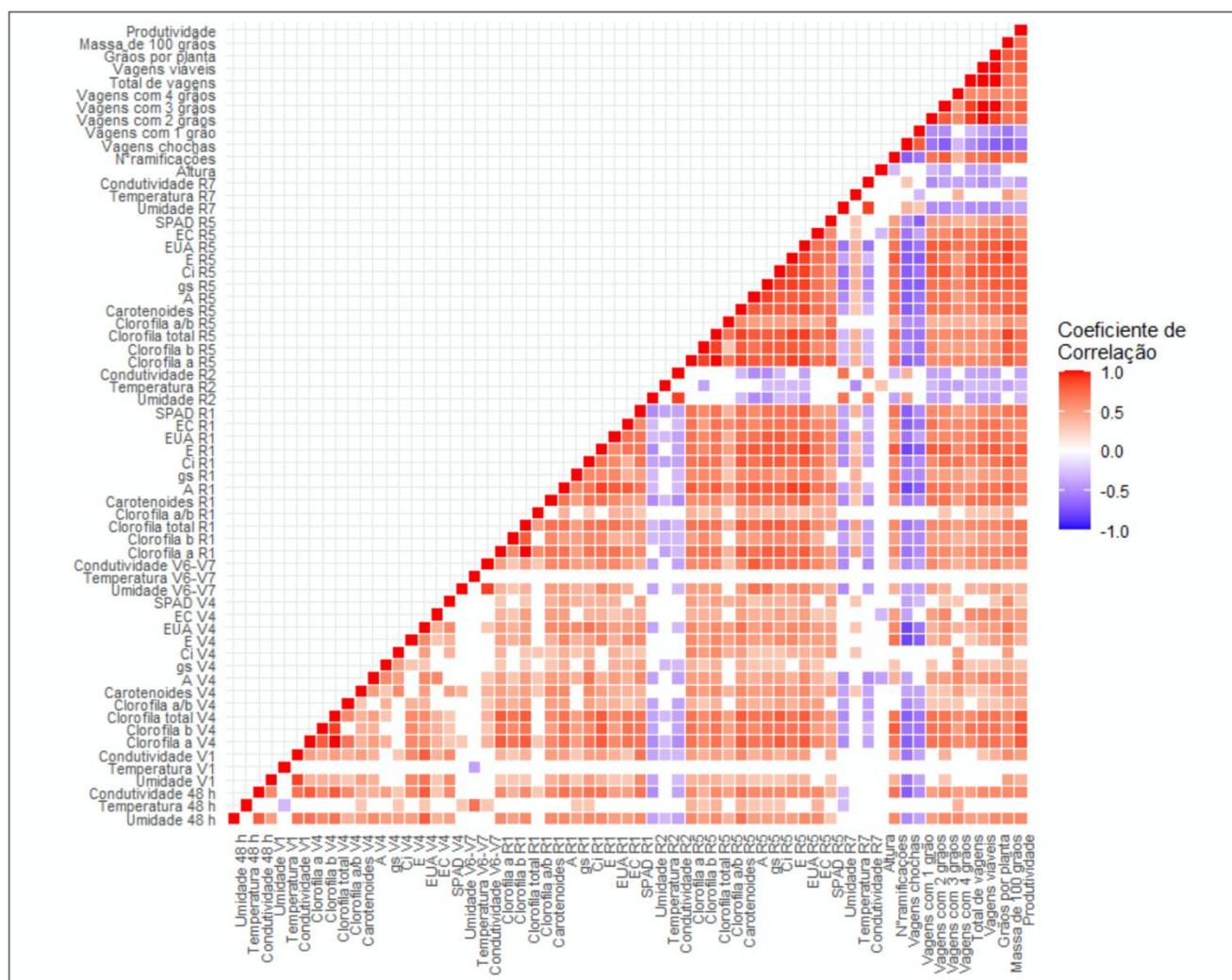
As variáveis temperatura, umidade e condutividade elétrica do solo em R2, umidade e condutividade elétrica do solo em R7 apresentaram correlações negativas com a produtividade, porém com coeficientes não relevantes (-0,34, -0,34, -0,36, -0,44, -0,48, respectivamente) (Figura 10).

Os teores de clorofilas apresentaram altas correlações com a produtividade em todos os estádios avaliados. Foram relevantes os coeficientes entre produtividade e *Cl_a* em V4 (0,79) e R5 (0,72), produtividade e *Cl_b* em V4 (0,78) e produtividade e *Cl_a+b* em V4 (0,81), R1 (0,72) e R5 (0,73) (Figura 10). Além disso, em R5 observaram-se correlações relevantes entre o índice SPAD e *Cl_a* (0,78) e *Cl_a+b* (0,77).

As variáveis de trocas gasosas *C_i* e *E* correlacionaram-se positivamente com a produtividade em R1 (0,72 e 0,77) e R5 (0,84 e 0,75). Também apresentaram altas correlações com a produtividade, a *A* em R1 (0,71) e a *g_s* em R5 (0,76) (Figura 10).

Em relação aos componentes de produção, NV3G, NTV e NGPP apresentaram correlações positivas com a produtividade (0,76, 0,73 e 0,78, respectivamente), enquanto NV1G e vagens chochas, correlações negativas (-0,42 e -0,6). NV2G, NV3G, NGPP e M100G apresentaram altas correlações com variáveis de trocas gasosas *g_s*, *C_i*, *E* e EUA em R5, com coeficientes variando de 0,73 a 0,86. A variável que menos se correlacionou com as demais foi altura de planta (Figura 10).

Figura 10 – Coeficientes de correlação linear de Pearson entre variáveis do solo (condutividade elétrica (CE), umidade e temperatura) obtidas 48h após a semeadura e nos estádios fenológicos V1, V6/V7, R2 e R7; fisiológicas da planta (conteúdo de clorofilas e carotenoides, índice SPAD, trocas gasosas (taxa de assimilação líquida de CO₂ (A), condutância estomática (gs), concentração interna de CO₂ (Ci), taxa transpiratória (E), eficiência do uso da água (EUA) e eficiência de carboxilação (EC)) amostradas nos estádios fenológicos V4, R1 e R5; biométricas da planta (altura, número de ramificações por planta, número de vagens chochas, número de vagens com um, dois três e quatro grãos, número total de vagens, número total de vagens viáveis e número de grãos por planta), e os componentes de produção (massa de 100 grãos e produtividade). Coeficiente variando de -1 a 1, sendo representado pela escala de cores (azul, quando coeficiente de correlação (r) é igual a -1; branco, r = 0; e vermelho, r = 1,0)



5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Todos os tratamentos de fertilização com potássio elevaram a condutividade elétrica do solo logo após sua aplicação, podendo representar aumento da salinização do solo, entretanto esse efeito foi passageiro, não persistindo por todo ciclo de cultivo, e, portanto, não impactando a produtividade, o que se confirmou pela baixa correlação entre as variáveis de solo estudadas (condutividade, umidade e temperatura) e a produtividade.

A adubação da cultura da soja com 90 kg ha⁻¹ de K₂O na pré-semeadura ou 90 kg ha⁻¹ de K₂O parcelados 25% na semeadura e 75% no estágio V4 proporcionou incrementos em praticamente todas as variáveis testadas, garantindo às plantas os maiores valores de pigmentos cloroplásticos, alta relação entre o teor de clorofilas e valores de índice SPAD, maiores eficiências no uso da água e na carboxilação, maiores valores na concentração interna de CO₂, na taxa de assimilação líquida de CO₂, na taxa transpiratória e na condutância estomática. Os maiores coeficientes de correlação entre as variáveis de trocas gasosas e a produtividade foram encontrados nos estádios reprodutivos (R1 e R5), evidenciando a importância do processo fotossintético para o enchimento dos grãos. A adubação potássica aplicada em pré semeadura ou parcelada na semeadura e em V4 também contribuiu para elevação dos componentes de produção. A alta correlação positiva entre NTV e a produtividade a ressaltar a importância da retenção de estruturas reprodutivas para obtenção de altas produtividades.

A aplicação total de potássio em pré-semeadura, além de conferir incrementos na fisiologia e na produtividade de plantas de soja, constitui-se numa prática econômica e operacionalmente mais viável em relação ao manejo tradicionalmente adotado, com aplicação de potássio na linha complementada por uma aplicação em cobertura.

6 CONCLUSÕES

A aplicação da dose total de potássio na pré-semeadura ou a aplicação parcelada em 25% na semeadura e 75% no estágio V4 ocasionaram plantas fisiologicamente mais ativas ao longo de todo o ciclo da cultura. Os teores de pigmentos cloroplastídicos nesses tratamentos mantiveram-se elevados durante todos os estádios avaliados, assim como os parâmetros de trocas gasosas, o que conjuntamente contribuiu para o melhor desenvolvimento das plantas. Dessa forma, nos tratamentos 2 e 12 houve incrementos nos componentes de produção e, conseqüentemente, maior produtividade em relação aos demais tratamentos testados.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEL - ANP. **Biodiesel**, 2020. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/biocombustiveis/biodiesel>.
- ALCÂNTARA, G. R.; REIS, E. F.; Queiroz, D.M. Produtividade das culturas correlacionada com condutividade elétrica aparente de um solo sob plantio direto. **Revista Agrotecnologia**, v. 3, n.2, p. 622-72, 2012.
- ANSCHUTZ, U.; BECKER, D.; E SHABALA, S. Going beyond nutrition: Regulation of potassium homeostasis as a common denominator of plant adaptive responses to environment. **Journal of Plant Physiology**, v. 171, p.670-687, 2014.
- BARBOSA, J. C.; MALDONADO JR., W. **Agro Estat. Sistema para análise estatística de ensaios agronômicos**. Versão 1.1.0626. FCAV/UNESP, 2011.
- BERNARDI, A. C. C. ; OLIVEIRA JUNIOR, J. P.; LEANDRO, W. M.; MESQUITA, T. G. S.; FREITAS, P. L.; CARVALHO, M.C.S. Doses e formas de aplicação da adubação potássica na rotação soja, milho e algodão em sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 39, p. 158-167, 2009.
- BHARATI, M. P.; WHIGHAM, D.K.; VOSS, R. D. Soybean response to tillage and nitrogen, phosphorus, and potassium fertilization. **Agronomy Journal**, v. 78, n. 6, p. 947-950, 1986.
- BOARD, J. E.; MODALI, H. Dry matter accumulation predictors for optimal yield in soybean. **Crop Science**, v. 45, n. 5, p. 1790-1799, 2005.
- BORKERT, C. M.; CASTRO, C.; OLIVEIRA, F. A.; KLEPKER, D.; OLIVEIRA-JUNIOR, A. O potássio na cultura da soja. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T.L., eds. **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba, Potafos, 2005. p.671-713.
- CAKMAK, I. The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic stresses in plants. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v.168, p.521-530, 2005.
- CATUCHI, T. A.; GUIDORIZZI, F. V. C.; GUIDORIZZI, K. A.; BARBOSA, A. M.; SOUZA, G. M. Respostas fisiológicas de cultivares de soja à adubação potássica sob diferentes regimes hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 4, p. 519-527, 2012.
- CAVALINI, P. F.; SEVILHA, A.; CRUZ, R. M. S. da; ALBERTON, O. Resposta da soja a épocas de aplicação de potássio em cobertura. **Arquivos de Ciências Veterinárias e Zoologia da UNIPAR**, v. 21, n. 1, p. 23-28, 2018.
- CHEN, D.; CAO, B.; WANG, S.; LIU, P.; DENG, X.; YIN, L.; ZHANG, S. Silicon moderated the K deficiency by improving the plant-water status in sorghum. **Scientific Reports**, v. 6, p.1-14, 2016.

COALE F. J.; GROVE, J. H. Root distribution and shoot development in notill full season and double -crop soybean. **Agronomy Journal**, v. 82, n. 3, p. 606-612, 1990.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos** (Safr 2019/20): v. 7, n. 5, Brasília: Conab, 2020. 114 p. 2020.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos** (Safr 2020/21): v. 8, n. 1, Brasília: Conab, 2020. 77 p. 2021.

DE OLIVEIRA, Fernando C.; COELHO, Suani T., 2017. **History, evolution, and environmental impact of biodiesel in Brazil: A review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, vol. 75(C), pages 168-179.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **História da soja**. Disponível em: www.embrapa.br/web/portal/soja/cultivos/soja1/historia. Acesso em: 20 jan. de 2021.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Tecnologias de Produção de Soja - Região Central do Brasil 2014**. Londrina: Embrapa Soja, 2013. 265 p.

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. Stages of soybean development. Ames, Yowa: **Yowa State University of Science and Technology, Cooperative Extension Service, Special Report**, n. 80, p.11, 1977.

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

FRANCISCO, E. A. B; CÂMARA, G. M. S.; SEGATELLI, C. R. Estado nutricional e produção do capim-pé-de-galinha e da soja cultivada em sucessão em sistema antecipado de adubação. **Bragantia**, v. 66, n. 2, p. 259-266, 2007.

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

GITTI, D. C.; ROSCOE, R. **MANEJO E FERTILIDADE DO SOLO PARA A CULTURA DA SOJA**. Tecnologia e Produção: Soja 2016/2017, Fundação MS, 2017.

GONÇALVES JUNIOR, A. C.; NACKE, H.; MARENGONI, N. G.; CARVALHO, E. A.; COELHO, G. F. Produtividade e componentes de produção da soja adubada com diferentes doses de fósforo, potássio e zinco. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 34, n.3, p. 660-666, 2010.

GONDIM, A. R. O.; SANTOS, J. L. G.; LIRA, R. P. L.; BRITO, M. E. B.; PEREIRA, F. H. Atividade fotossintética da beterraba submetida a adubação mineral e esterco bovino.

Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável, v. 10, n. 2, p. 61-65, 2015.

HAFSI, C.; DEBEZ, A. E.; ABDELLY, C. Potassium deficiency in plants: effects and signaling cascades. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 36, p. 1055-1070, 2014.

HIRAKURI, Marcelo Hiroshi; LAZZAROTTO, Joelsio José. O agronegócio da soja nos contextos mundial e brasileiro. **Embrapa Soja-Documentos (INFOTECA-E)**, 2014.

JIA, Y.; YANG, X.; ISLAM, E.; FENG, Y. Effects of potassium deficiency on chloroplast ultrastructure and chlorophyll fluorescence in inefficient and efficient genotypes of rice. **Journal of Plant Nutrition**, v. 31, n. 12, p. 2105-2118, 2008.

JÚLIO, O. L. L. de; ASCARI, J. P.; MENDES, I. R. N.; SANTOS, E. S. S.; DUARTE, W. M.; NIED, A. H. Formas de adubação potássica e produtividade da cultura da soja. **Revista Agrarian**, v.9, n.32, p. 149-155, 2016.

KASSAMBARA, A.; KASSAMBARA, M.A. **Package ‘ggcorrplot’**. R package version 0.1, v. 3, n. 3, 2019.

LANA, R. M. Q.; HAMAWAKI, O. T.; LIMA, L. M. L. de; ZANAO JUNIOR, L. A. Resposta da soja a doses e modos de aplicação de potássio em solo de cerrado. **Bioscience Journal**, v. 18, n. 2, p. 17-23, 2002.

LESCH, S.M.; CORWIN, D.L.; ROBINSON, D.A. Apparent soil electrical conductivity mapping as an agricultural management tool in arid zone soils. **Computer and Electronics in Agriculture**, v.46, n. 1-3, p.351-378, 2005.

MASCARENHAS, H. A. A.; TANAKA, R. T.; WUTKE, E. B.; BRAGA, N. R.; MIRANDA, M. A. C. de. **Potássio para a soja**. Piracicaba-SP: Potafos, 2004. 2 p.

MASCARENHAS, H. H. A.; ESTEVES, J. A. de F.; WUTKE, E. B.; RECO, P. C.; LEÃO, P. C. da L. Deficiências e toxicidade visuais de nutrientes em soja. **Revista Nucleus**, v.10, n. 2, p. 281-306, 2013.

MATOS, M. A.; SALVI, J. V.; MILAN, M. Pontualidade na operação de semeadura e a antecipação da adubação e suas influências na receita líquida da cultura da soja. **Engenharia Agrícola**, v. 26, n. 2, p. 493-501, 2006.

MELO, A. S. de; SILVA JÚNIOR, C. D. da; FERNANDES, P. D.; SOBRAL, L. F.; BRITO, M. E. B.; DANTAS, J. D. M. Alterações das características fisiológicas da bananeira sob condições de fertirrigação. **Ciência Rural**, v. 39, n. 3, p. 733-741, 2009.

MESCHEDE, D. K.; VELINI, E. D.; CARBONARI, C. A.; SILVA, J. R. M. Alteração fisiológica da cana-de-açúcar pela aplicação de Glyphosate e Sulfometuron-Methyl. **Planta Daninha**, v.29, n.2, p. 413-419, 2011.

MIAO, B.; HAN, X.; ZHANG, W. The ameliorative effect of silicon on soybean seedlings grown in potassium-deficient medium. **Annals of Botany**, v.105, p. 967-973, 2010.

MOTERLE, L. M.; LOPES, P. C.; BRACCINI, A. L.; SCAPIM, C. A. Germinação de sementes e crescimento de plântulas de cultivares de milho-pipoca submetidas ao estresse hídrico e salino. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 28, n.3, p. 169–176 2006.

MYERS, S. W.; GRATTON, C.; WOLKOWSKI, R. P.; HOGG, D.B.; WEDBERG, J. L. Effect of soil potassium availability on soybean aphid (Hemiptera: Aphididae) population dynamics and soybean yield. **Journal of Economic Entomology**, v. 98, n. 1, p. 113-120, 2005.

NELSON K. A.; MOTAVALLI, P. P.; NATHAN, M. Response of no-till soybean [*Glycine max* (L.) Merr] to timing of preplant and foliar potassium applications in a claypan soil. **Agronomy Journal**, v. 97, n. 3, p. 832-838, 2005.

OLIVEIRA, F.A. de; CASTRO, C.de; SFREDO, G.J.; KLEPKER, D.; OLIVEIRA JÚNIOR, A. de. **Fertilidade do Solo e Nutrição Mineral da Soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2008. 8 p.

PASSOS, A.M; REZENDE, P.M; ALVARENGA, A.A; BALIZA, D.P; CARVALHO, E.R; ALCÂNTARA, H.P. Yield per plant and other characteristics of soybean plants treated with kinetin and potassium nitrate. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n. 5, p. 965-972, 2011.

PEARSON'S, K. **Early Statistical Papers**. Cambridge, England: University Press., 1948.

PEDROTTI, A.; CHAGAS, R. M.; RAMOS, V. C.; PRATA, A. P. N.; LUCAS, A. A.T.; SANTOS, P. B.; Causas e consequências do processo de salinização dos solos. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental Santa Maria**, v. 19, n. 2, p. 1308- 1324, 2015.

PETTER, F. A.; ANDRADE, F. R.; ZUFFO, A. M.; MONTEIRO, M. M. S.; PACHECO, L. P.; ALMEIDA, F. A. Doses e épocas de aplicação de potássio no desempenho agrônomo do milho no cerrado piauiense. **Comunicata Scientiae**, v. 7, n. 3, p. 372-382, 2016.

PETTIGREW, W. T. Potassium influences on yield and quality production for maize, wheat, soybean and cotton. **Physiologia Plantarum**, v.133, n.4, p. 670-681, 2008.

RAIJ, B. van; 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, Fundação IAC, 1996. 285p.

RÊGO, G. M.; POSSAMAI, E. **Avaliação dos Teores de Clorofila no Crescimento de Mudanças do Jequitibá-Rosa (*Cariniana legalis*)**. Comunicado Técnico 128, Colombo: Embrapa, 2004. 4p.

ROCHA, B. G. R.; AMARO, H. T. R.; PORTO, E. M.V.; GONÇALVES, C. C.; DAVID, A. M. S. S.; LOPES, E. B. Sistema de semeadura cruzada na cultura da soja: avanços e perspectivas. **Revista de Ciências Agrárias**, v.41, n.2, p. 91-100, 2018.

SANT'ANA E. V. P.; SANTOS, A. B.; SILVEIRA, P. M. Adubação nitrogenada na produtividade, leitura SPAD e teor de nitrogênio em folhas de feijoeiro. *Pesquisa Agropecuária Tropical* 40: 491-496, 2010.

SARAH, M. M. S.; PRADO, R. M.; TEIXEIRA, G. C. M.; SOUZA JÚNIOR, J. P.; MEDEIROS, R. L. S.; BARRETO, R. F. Silicon supplied via roots or leaves relieves potassium deficiency in maize plants. **Silicon**, 2021.

SEDIYAMA, T. (Ed.). **Tecnologias de produção e usos da soja**. Londrina: Ed. Mecenaz, 2009. 314p.

SERAFIM M. E.; ONO, F. B.; ZEVIANI, W. M.; NOVELINO, J. O.; SILVA, J. V. Umidade do solo e doses de potássio na cultura da soja. **Revista Ciência Agronômica**, vol. 43, n.2, p.222-227, 2012.

SFREDO, G. J. **Soja no Brasil: calagem, adubação e nutrição mineral**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Embrapa Soja. Documentos 305, 2008.

SHARMA, T.; DREYER, I.; E RIEDELSBERGER, J. The role of K⁺ channels in uptake and redistribution of potassium in the model plant *Arabidopsis thaliana*. **Frontiers Plant Science**, v. 4, p.1-16, 2013.

SILVA, A. F.; LAZARINI, E. Doses e épocas de aplicação de potássio na cultura da soja em sucessão a plantas de cobertura. **Ciências Agrárias**, v. 35, n. 1, p. 179-192, 2014.

SILVA, M. A. G.; BOARETTO, A. E.; FERNANDES, H. G.; SCIVITTARO, W. B. Efeito do cloreto de potássio na salinidade de um solo cultivado com pimentão, *Capsicum annuum* L., em ambiente protegido. **Acta Scientiarum**, v.23, p.1085-1089, 2001.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I.; MURPHY, A. Fisiologia e desenvolvimento vegetal. 6.ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 888 p.

TANAKA, R. T.; MASCARENHAS, H. A. A.; BORKERT, C. M. Nutrição mineral da soja. In: ARANTES, N. E.; SOUZA, P. I. M. (Eds.). **Cultura da soja nos cerrados**. Piracicaba: Potafos, 1993. p. 105-135.

TRÄNKNER, Merle; TAVAKOL, Ershad; JÁKLI, Bálint. Functioning of potassium and magnesium in photosynthesis, photosynthate translocation and photoprotection. **Physiologia plantarum**, v. 163, n. 3, p. 414-431, 2018.

UCHÔA, S. C. P.; PAIN, R. J.; ALVES, J. M. A.; SILVA, D. C. O.; MELO, V. F.; SILVA, S. Doses and potassium partitioning methods in soybean production components in an Amazonian savanna. **Revista Agro@mbiente On-line**, v. 12, p. 258-271, 2018.

USDA. United States Department of Agriculture Foreign Agricultural Service. **Grain report**. 2019.

USDA. United States Department of Agriculture Foreign Agricultural Service. **Grain report**. 2020.

VIANA, E. M.; KIEHL, J. C. Doses de nitrogênio e potássio no crescimento do trigo. **Bragantia**, v. 69, n. 4, p. 975-982, 2010.

VILELA, L.; SOUZA, D. M. G.; MARTHA JR., G. B. Adubação potássica e com micronutrientes. In: MARTHA JR., G. B.; VILELA, L.; SOUZA, D. M. G. **Cerrados: Uso Eficiente de Corretivos e Fertilizantes em Pastagens**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2007. p. 179-188.

VILELA, L.; SOUZA, D. M. G.; SILVA, J. E. Adubação potássica. In: SOUZA, D. M. G. de; LOBATO, E. (Ed.). **Cerrados: correção do solo e adubação**. 2. ed. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004. p. 169-184.

WANG, Y., WU, W. Genetic approaches for improvement of the crop potassium acquisition and utilization efficiency. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 25, p. 46–52, 2015.

WASKOM, R. M.; WESTFALL, D. G.; SPELLMAN, D. E.; SOLTANPOUR, P. N. Monitoring nitrogen status of corn with a portable chlorophyll meter. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 27, p. 545-560, 1996.

WELLBURN, A.R. The spectral determination of chlorophylls a and b; as well as total carotenoids; using various solvents with spectrophotometers of different resolution. **Journal of Plant Physiology**, v.144, p.307-313, 1994.

YOKOYAMA, A. H.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; ZUCARELI, C.; RIBEIRO, R.H. Índice de área foliar e SPAD durante o ciclo da soja em função da densidade de plantas e sua relação com a produtividade de grãos. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 17, n.4, p. 531 -538, 2018.

ZAIN, N. A. M.; ISMAIL, M. R. Effects of potassium rates and types on growth, leaf gas exchange and biochemical changes in rice (*Oryza sativa*) planted under cyclic water stress. **Agricultural Water Management**, v. 164, p. 83-90, 2016.