

DESEMPENHO DA CULTURA DA SOJA EM RESPOSTA A FONTES E DOSES DE ADUBAÇÃO EM DIFERENTES TIPOS DE SOLO E CONDIÇÕES DE CULTIVO

Cibelle Christine Brito Ferreira¹, Clauber Rosanova², Juliano Magalhães Barbosa³, Edmar Vinicius de Carvalho³, Reinaldo Ferreira Medeiros³, Saulo de Oliveira Lima⁴

RESUMO:

O objetivo foi avaliar fontes e doses de adubação no desenvolvimento da soja sob plantio direto, em diferentes tipos de solos, com o intuito de promover práticas sustentáveis e produtivas no Cerrado. O estudo comparou o desempenho da soja, variedade DM80I79 IPRO, conduzida em plantio direto em solos frágeis do Cerrado, submetida a diferentes fontes e doses de adubação. Os tratamentos foram dois tipos de solos (Neossolo Quartzarênico Órtico típico e Plintossolo Pétrico Concrecionário argissólico), três fontes de adubação (solúvel, remineralizador e fosfato natural) aplicadas em cinco concentrações (0%, 50%, 100%, 150% e 200% da dose recomendada de P_2O_5 para a cultura da soja) conduzidos em delineamento inteiramente casualizado (DIC), em arranjo fatorial $2 \times 3 \times 5$ (solo, fontes de adubação e concentrações), com quatro repetições. A fonte de adubação solúvel (Super Simples) teve efeito positivo em desenvolvimento e crescimento de plantas, assim como na produtividade, ao apresentar resultados superiores aos obtidos com a aplicação das demais fontes de adubação, com destaque para os resultados obtidos na dose de 3 Mg ha^{-1} , tanto em sistema de cultivo convencional, quanto em plantio direto. O Fosfato natural por sua vez, embora tenha sido inferior à fonte solúvel, obteve resultados superiores aos apresentados com o uso de remineralizador, o mesmo inferiu positivamente na produtividade e no desenvolvimento de planta a dose de 3 Mg ha^{-1} . Assim, os resultados indicaram que fosfato natural pode ser eficaz como complemento nutricional, mas não substitui completamente os fertilizantes solúveis.

Palavras-chave: Neossolo Quartzarênico Órtico típico; Plintossolo Pétrico Concrecionário argissólico; Remineralizador; Fosfato natural.

SOYBEAN CROP PERFORMANCE IN RESPONSE TO FERTILIZATION SOURCES AND RATES IN DIFFERENT SOIL TYPES AND GROWING CONDITIONS

The objective of this study was to evaluate fertilizer sources and application rates on soybean development under no-tillage in different soil types, aiming to promote sustainable and productive practices in the Cerrado biome. The study compared the performance of soybean (variety DM80I79 IPRO) grown under no-tillage in fragile Cerrado soils subjected to different fertilizer sources and rates. Treatments consisted of two soil types (Typic Quartzipsamment and Petric Plinthosol with argisolic characteristics), three fertilizer sources (soluble, remineralizer, and natural phosphate), and five application rates (0%, 50%, 100%, 150%, and 200% of the recommended P_2O_5 rate for soybean cultivation). The experiment followed a completely randomized design (CRD) in a $2 \times 3 \times 5$ factorial arrangement (soil type, fertilizer source, and application rate) with four replications. The soluble fertilizer source (Single Superphosphate) showed a positive effect on plant growth

¹Professora Doutora, da Universidade Estadual do Tocantins. Palmas - TO, cibelle.cb@unitins.br. <https://orcid.org/0000-0002-2658-3983>. ²Professor Doutor do Instituto Federal do Tocantins. Palmas - TO, clauber@ifto.edu.br. <https://orcid.org/0000-0001-6772-1505>. ³Professor Doutor do Instituto Federal do Tocantins. Lagoa da Confusão - TO, juliano.barbosa@ifto.edu.br. <https://orcid.org/0000-0003-2245-2537>; edmar.carvalho@ifto.edu.br, <https://orcid.org/0000-0002-4563-2015>; reinaldo.medeiros@ifto.edu.br. <https://orcid.org/0009-0008-4975-8417>. ⁴Professor Doutor da Fundação Universidade Federal do Tocantins, Gurupi - TO, saulolima@uft.edu.br. <https://orcid.org/0000-0002-8824-3925>.

and development, as well as on yield, presenting superior results compared to the other fertilizer sources, particularly at the 3 Mg ha⁻¹ rate, both in conventional and no-tillage systems. Natural phosphate, although less effective than the soluble source, produced better results than the remineralizer, also contributing positively to yield and plant development at the 3 Mg ha⁻¹ rate. Thus, the results indicate that natural phosphate can be effective as a nutritional supplement but does not fully replace soluble fertilizers.

Keywords: Typic Quartzipsamment; Petric Plinthosol with Argic horizon characteristics; Rock remineralizer; Rock phosphate.

INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max*) é uma das culturas mais importantes no cenário agrícola mundial, destacando-se pela sua versatilidade na alimentação humana e animal, além de ser uma matéria-prima fundamental para a indústria de biocombustíveis (CONAB, 2023). O manejo adequado da adubação é essencial para maximizar o potencial produtivo da soja, especialmente em sistemas de plantio direto, que têm se consolidado como uma prática sustentável por promover a conservação do solo e da água (Cruz et al., 2024).

O sistema de plantio direto é caracterizado pela ausência de revolvimento do solo, manutenção de cobertura vegetal e rotação de culturas, fatores que contribuem para a melhoria da estrutura do solo e da sua fertilidade a longo prazo (Derpsch et al., 2014). No entanto, a resposta da soja a diferentes fontes e doses de adubação pode variar significativamente conforme o tipo de solo, exigindo um entendimento aprofundado sobre a interação entre esses elementos para otimizar a produção.

Pesquisas indicam que a disponibilidade de nutrientes no solo é um dos principais fatores limitantes para a produtividade da soja. A escolha adequada de fertilizantes, bem como a determinação das doses ideais, é crucial para atender às necessidades nutricionais da planta em diferentes condições edafoclimáticas (Hungria et al., 2017). Além disso, a variabilidade na composição física e química dos solos brasileiros exige abordagens específicas para cada região, visando a máxima eficiência no uso dos insumos agrícolas (Santos et al., 2013).

Diante do exposto, este trabalho teve por objetivo avaliar o desempenho da cultura da soja em resposta a diferentes fontes e doses de adubação em sistemas de plantio direto, considerando dois tipos de solo.

MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Localização

O experimento foi conduzido em casa de vegetação da Universidade Federal do Tocantins (UFT), Campus Universitário de Gurupi, localizado na região sul do Estado do Tocantins, nas coordenadas geográficas, latitude: 11° 43' Sul e longitude: 49° 04' oeste, a 280 metros de altitude. O clima regional é do tipo B1wA'a', segundo a classificação de Thornthwaite (1948), caracterizado como úmido com moderada deficiência hídrica.

2.2 Classificação dos solos

Os solos utilizados foram classificados através do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) (Santos et al., 2018), como: Neossolo Quartzarênico Órtico típico, com 7,5% de argila, 5% de silte e 87,5% de areia, coletado nas coordenadas de latitude 10°13'22,05'' S e longitude 47°37'50,87'', e Plintossolo Pétrico Concrecionário argissólico, com 18% de terra fina, 82% de petroplintita, 60% de areia total, 5% de silte e 35% de argila, coletado nas coordenadas latitude 11°44'49''S e longitude 49°03'04''.

Os solos foram coletados na camada de 0 – 20 cm e não foram passados em peneira para garantir a agregação do perfil analisado. As plantas de soja foram conduzidas em vasos com dimensões aproximadas de 35 cm de altura por 40 cm de diâmetro e capacidade para 10 litros de solo.

A caracterização química e granulométrica (teores de argila, silte e areia) de cada solo são apresentados na Tabela 1. Para calcular a diferença de terra fina e cascalho de cada solo foi separado o volume através da peneira com malha de 2 mm de abertura, ou seja, o que ficou retido na peneira foi classificado como cascalho, de acordo com terminologia descrita na NBR 6502 (ABNT, 1995).

Tabela 1 - Caracterização química e física dos solos originais utilizados no experimento em vasos. Gurupi – TO, 2023.

Solo	Ca	Mg	Al	H+Al	K	CTC	SB	K	P-meh
	-----cmol _c dm ⁻³ -----							-----mg dm ⁻³ -----	
RQ	0,5	0,1	0,3	2,00	0,03	2,63	0,63	10,0	2,6
FF	0,3	0,1	0,6	2,50	0,04	2,94	0,44	16,0	1,2
	V	m	M.O.	pH			Areia	Silte	Argila
	-----%-----			H ₂ O			-----g kg ⁻¹ -----		
RQ	24,00	32,00	0,80	4,5			875	50	75
FF	15,00	58,00	1,80	4,4			600	50	350

RQ: Neossolo Quartzarênico; FF: Plintossolo Pétrico; Ca: Cálcio; Mg: Magnésio; Al: Alumínio; H+Al: Acidez potencial; K: Potássio trocável; CTC: capacidade de troca catiônica efetiva; SB: soma de bases; P-meh: Fósforo disponível (Mehlich-1); V: saturação por bases; m: saturação por alumínio; M.O.: matéria orgânica; pH H₂O: potencial hidrogeniônico em água.

2.3 Fertilização e definição de doses

Foi aferido o peso de cada um dos vasos, obtendo-se a massa média de solo por vaso (8,01 kg para o Neossolo Quartzarênico — RQ; 9,00 kg para o Plintossolo Pétrico — FF). A partir da massa de solo e das análises químicas iniciais, foi calculada a recomendação de calagem e adubação (Embrapa, 2004). A recomendação de calagem adotou o método de saturação por bases para elevar a saturação por bases (V%) a 60%.

A partir dos teores de P₂O₅ nas fontes utilizadas, superfosfato simples (SS = 18,0% P₂O₅), remineralizador (RM = 5,76% P₂O₅) e fosfato natural (FN = 9,30% P₂O₅), foram definidas as doses correspondentes aos tratamentos: 0% (testemunha, 0 kg P₂O₅ ha⁻¹), 50%, 100%, 150% e 200% da dose recomendada, cujos equivalentes em kg P₂O₅ ha⁻¹ encontram-se apresentados na Tabela 2.

As quantidades de P (fósforo) e K (potássio) aplicadas foram calculadas com base nos teores de

P₂O₅ e K₂O de cada fonte de adubação e na recomendação de correção e adubação de solos do Cerrado (Embrapa, 2004). Na Tabela 3 são apresentadas as massas de fertilizantes aplicadas por vaso (g vaso⁻¹). Para melhorar a reprodutibilidade do experimento, as mesmas doses foram convertidas para kg P₂O₅ ha⁻¹, considerando 1 ha na camada de 0 – 20 cm ≈ 2.000.000 kg de solo (densidade aparente ≈ 1,0 g cm⁻³).

A dose de referência (100%) foi equivalente a aproximadamente 299,8 kg P₂O₅ ha⁻¹ (SS), 299,6 kg P₂O₅ ha⁻¹ (RM) e 371,5 kg P₂O₅ ha⁻¹ (FN) no Neossolo Quartzarênico; e 300,0 kg P₂O₅ ha⁻¹ (SS), 300,0 kg P₂O₅ ha⁻¹ (RM) e 372,0 kg P₂O₅ ha⁻¹ (FN) no Plintossolo Pétrico. A Tabela 4 detalha as doses equivalentes de K₂O (kg ha⁻¹) em função das fontes e níveis de aplicação, para Neossolo Quartzarênico (RQ) e Plintossolo Pétrico (FF), os teores de P₂O₅ nas fontes, por sua vez, estão detalhados nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 2. Doses de P₂O₅ aplicadas (kg ha⁻¹) em função das fontes de adubação e concentrações (0, 50, 100, 150 e 200%) de aplicação, para Neossolo Quartzarênico (RQ) e Plintossolo Pétrico (FF). Gurupi – TO, 2023.

Fonte / Dose (%)	Solo	0%	50%	100%	150%	200%
Superfosfato Simples (SS)	RQ	0	150	300	450	600
	FF	0	150	300	450	600
Remineralizador (RM)	RQ	0	150	300	450	600
	FF	0	150	300	450	600
Fosfato Natural (FN)	RQ	0	186	372	558	744
	FF	0	186	372	558	744

Tabela 3. Recomendação de adubação em grama por recipiente. Gurupi – TO, 2023.

	Fonte de adubação				Calagem	Fertilizantes		M. solo kg vaso ⁻¹
	Dose (%)	SS	RM	FN	Calcário	KCl Plantio	KCl Cobertura	
Solo	(%)	-----g vaso ⁻¹ -----						
RQ	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,01
	50	3,33	10,42	8,00	4,40	0,52	0,52	
	100	6,67	20,83	16,00	4,40	1,03	1,03	
	150	10,00	31,25	24,00	4,40	1,55	1,55	
	200	13,33	41,67	32,00	4,40	2,07	2,07	
FF	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9,00
	50	3,75	11,72	9,00	4,80	0,70	0,70	
	100	7,50	23,44	18,00	4,80	1,40	1,40	
	150	11,25	35,16	27,00	4,80	2,09	2,09	
	200	15,00	41,67	36,00	4,80	2,79	2,79	

SS: Superfosfato Simples; RM: Remineralizador; FN: Fosfato Natural; RQ: Neossolo Quartzarênico; FF: Plintossolo Pétrico; M.solo: massa de solo.

2.4 Caracterização das fontes de adubação

No tratamento solúvel utilizou-se Superfosfato Simples (SS) como fonte de P e Cloreto de Potássio (KCl) como fonte de K. O KCl foi aplicado em parcela dupla (50% no plantio e 50% em cobertura), conforme indicado na Tabela 2, e a dose foi calculada com base nas recomendações de K da Embrapa (2004), adotadas para as condições do experimento. Considerou-se KCl com 58% de K₂O;

assim, a massa de KCl aplicada por vaso foi multiplicada por 0,58 para obter a massa de K₂O por vaso, e em seguida convertida para equivalentes em kg K₂O ha⁻¹ para 1 ha (0 – 20 cm) $\approx$ 2.000.000 kg de solo (densidade aparente $\approx$ 1,0 g cm⁻³). Para maior clareza e comparação entre tratamentos, os valores de K₂O fornecidos pelo KCl e os K₂O intrínsecos nas fontes remineralizadora e fosfato natural foram calculados e estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Doses equivalentes de K₂O (kg ha⁻¹) em função das fontes e concentração (0, 50, 100, 150 e 200%) de aplicação, para Neossolo Quartzarênico (RQ) e Plintossolo Pétrico (FF). Gurupi – TO, 2023.

Fonte / Dose (%)	Solo	0%	50%	100%	150%	200%
K ₂ O do KCl (SS)	RQ	0,00	150,61	298,33	448,94	599,55
	FF	0,00	180,44	360,89	538,76	719,20
K ₂ O do RM (intrínseco)	RQ	0,00	117,08	234,04	351,12	468,20
	FF	0,00	117,20	234,40	351,60	468,00
K ₂ O do FN (intrínseco)	RQ	0,00	51,34	102,67	154,01	205,34
	FF	0,00	51,40	102,80	154,20	205,60

No tratamento com remineralizador foi utilizado como fonte de fertilização de solo e planta resíduos de rocha extraída e moída na região de Peixe, no estado do Tocantins, apresentando granulometria

de 100% passante em 2 mm, 99,71% passante em 0,84 mm e 90,36% passante em 0,3 mm, com as características químicas descritas na Tabela 5.

Tabela 5. Composição e características químicas da rocha extraída e moída na região de Peixe – TO.

Si	CaO	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	B	Fe
-----%-----						
31,08	1,2	5,76	4,5	0,54	0,24	3,72

Fonte: Laboratório CAMPO, 2020.

No tratamento com fosfato natural foi utilizado como fonte de fertilização de solo e planta resíduos de rocha extraída e moída em Taipas do Tocantins, apresentando as seguintes características:

granulometria de 100% passante em 2 mm, 77% passante em 0,3 mm e 45% passante em 0,075 mm, com as características químicas descritas na Tabela 6.

Tabela 6. Características químicas do pó de rocha fosfática extraída e moída no município de Taipas do Tocantins – TO.

SiO ₂	CaO	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	FeO ₂	N ₂ O	TiO ₂	MnO
-----%-----									
58,03	12,14	9,30	2,57	1,72	7,47	3,72	0,12	0,40	0,30

Fonte - Rialma, 2019.

2.5 Caracterização da cultivar

Utilizou-se a cultivar de soja DM80I79 IPRO, grupo de maturação 8,0 e hábito de crescimento indeterminado. O cultivo foi conduzido em vasos, em casa de vegetação, simulando condições de campo. Foram estabelecidos dois ciclos experimentais: no primeiro, a semeadura ocorreu em 15 de novembro de 2021, e a colheita em 06 de março de 2022, simulando o cultivo convencional; no segundo, a semeadura foi realizada em 15 de novembro de 2022, e a colheita em 06 de março de 2023, simulando o plantio direto.

As sementes foram tratadas com fungicida Tiofanato-metílico e com o composto fungicida + inseticida Piraclostrobina + Tiofanato-metílico, sendo as doses utilizadas definidas conforme recomendações de bula. Posteriormente, as sementes foram inoculadas com estirpes comerciais de *Bradyrhizobium japonicum*, recomendadas para a cultura da soja, seguindo as orientações do fabricante. Em seguida, foram semeadas quatro (4) sementes por vaso, avaliando-se o índice de velocidade de emergência (IVE) e a porcentagem de emergência.

Para a condição de plantio direto, foi cultivado o capim *Panicum maximum* cv. Mombaça, em 01 de abril 2022, e feito o corte 120 dias após emergência, em 01 de agosto de 2022, mantendo a palhada cortada sobre os vasos para, após a secagem natural da biomassa, foi realizado o plantio das sementes de soja.

2.6 Variáveis avaliadas

As variáveis em respostas aos tratamentos aplicados no trabalho (tipo de solo, adubação e técnicas de cultivo), foram: levantamento de diâmetro de colo (DC), altura de planta (AP), biomassa fresca, número de vagens e número e massa de grãos.

Após germinação e estabelecimento de plântulas, foi realizado o desbaste, deixando duas plantas por vasos, uma para mensurar desenvolvimento inicial (altura, diâmetro e biomassa), após 30 dias de semeadura, e outra para análise de produtividade e crescimento de planta durante todo o ciclo (112 dias).

O diâmetro do colo foi avaliado com o auxílio de um paquímetro digital com medidas aferidas em milímetros, conforme a metodologia de Caione et al. (2011), com início da medição a partir dos 10 dias de germinação.

A variável altura de planta foi determinada com o auxílio de uma régua graduada em centímetros, medindo do colo até o ápice da planta, seguindo a recomendação de Santos (2006), verificando altura de planta em função do tempo e em função das doses e fontes de adubação. A medição da altura da planta (AP) e diâmetro do colo (DC) foram analisadas a cada 10 dias. Com realização aos 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 e 90 dias após a germinação.

Para o cálculo da média do número de vagens, foram avaliadas quatro repetições (plantas) por tratamento, sendo o valor obtido dividido pelo número de plantas avaliadas em cada tratamento. O

cálculo do número de grãos seguiu o mesmo procedimento adotado para a variável anterior.

A massa de grãos foi calculada com base no peso obtido em cada tratamento, utilizando uma balança de precisão, com correção da umidade dos grãos para aproximadamente 13%, conforme descrito anteriormente. Após, realizou-se a análise de correlação entre a temperatura do solo e a massa de grãos.

2.7 Irrigação e tratos culturais

O experimento recebeu suplementação de água por micro aspersor modelo rondo ultra-102LPH, vazão 102 L h⁻¹, sendo aplicado aproximadamente 6 mm por dia, tendo como média 700 mm de água para suprir a necessidade da cultura da soja. Foi realizado controle de lagartas e percevejos mediante defensivos sempre que necessário a fim de reduzir os danos ao cultivo conforme as recomendações para a cultura da soja na região.

2.8 Análise estatística

Os modelos das regressões foram ajustados conforme o nível de significância dos betas e dos coeficientes de determinação (R^2).

A análise de correlação de Pearson foi utilizada para quantificar os efeitos da temperatura na massa de grãos da soja cultivada nos solos com diferentes concentrações de concreções. O

procedimento estatístico foi realizado no programa R versão 4.0 (R Core Team, 2020) e os gráficos plotados no programa Excel, versão 2021.

A matriz de dados foi submetida a uma Análise de Componentes Principais (ACP). Adicionalmente, utilizou-se uma análise de agrupamentos hierárquicos (HCA) combinada com mapa de calor (Heatmap). As análises foram realizadas com o auxílio do software R versão 4.2.0 (R Core Team, 2023).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Análise de Componentes Principais (ACP) demonstrou ser eficaz na redução da dimensionalidade dos dados, capturando 60,7% da variância total nos dois primeiros eixos. O primeiro componente (CP1), responsável por 38,1% da variância, revelou um padrão claro de associação entre a qualidade química do solo e a produtividade da soja (Figura 1). Atributos relacionados a fertilidade, como Capacidade de Troca Catiônica (CTC; $r = 0,90$), Soma de Bases (SB; $r = 0,90$), Magnésio (Mg; $r = 0,87$), Cálcio (Ca; $r = 0,84$) e Condutividade Elétrica (CE; $r = 0,80$), apresentaram correlações positivas e significativas ($p < 0,01$) com variáveis de rendimento, incluindo número de vagens ($r = 0,50$), peso de grãos ($r = 0,50$), número de grãos ($r = 0,49$) e biomassa ($r = 0,44$).

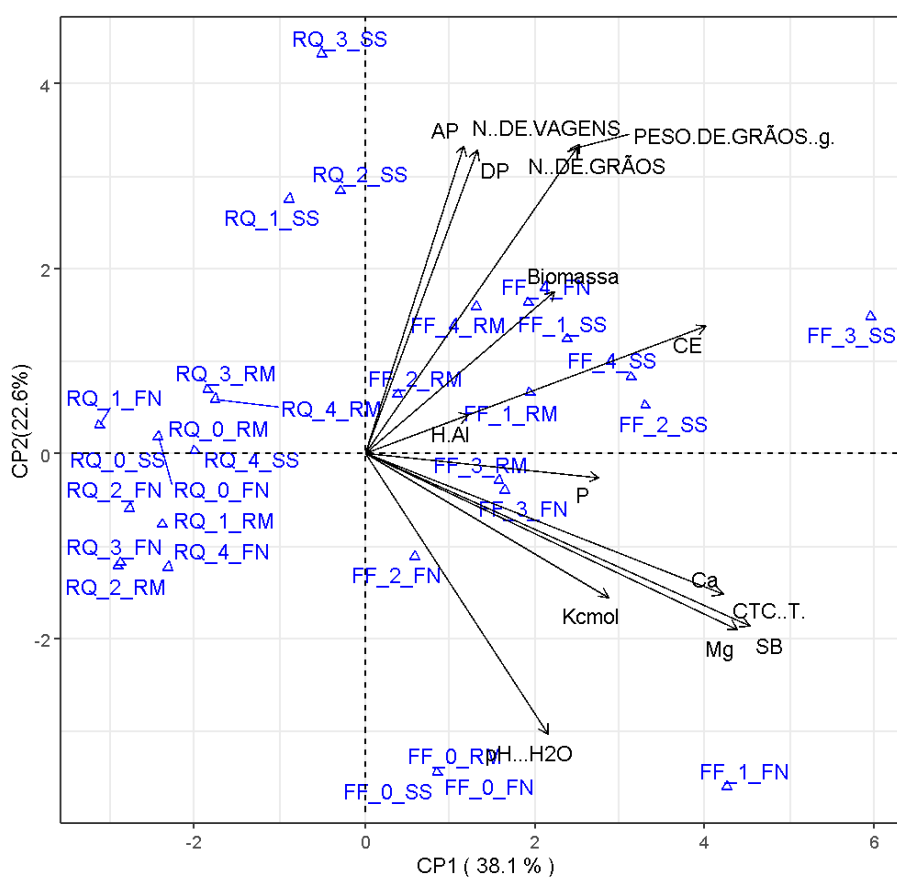


Figura 1. Dispersão gráfica biplot de fontes e doses de adubação na cultura da soja cultivar DM80I IPRO, baseada em escores de 15 caracteres produtivos e de fertilidade do solo, representados pelos dois primeiros componentes principais.

Esses resultados destacam a dependência do desempenho da soja em relação a capacidade do solo de reter e fornecer nutrientes. A forte associação da CTC e da SB com os componentes de produtividade corroboram com os achados recentes de Cherubin et al. (2021), que enfatizam a importância desses indicadores de fertilidade para a sustentabilidade dos agroecossistemas. Da mesma forma, o papel do Ca (Cálcio) e do Mg (Magnésio), nutrientes essenciais para o desenvolvimento estrutural e fisiológico da planta, é consistentemente reafirmado em estudos de manejo nutricional (Juhász et al., 2020). A correlação positiva da CE, neste contexto, reflete provavelmente a presença de nutrientes solúveis disponíveis para a planta, um fenômeno também observado em solos tropicais bem manejados, em contraste com ambientes salinos onde a CE elevada é prejudicial.

A consistência dessas relações é validada por Silva et al. (2022), cuja meta-análise em escala global confirma que a fertilidade do solo, particularmente a disponibilidade de cátions trocáveis, permanece como um dos fatores mais críticos para a

produtividade de grãos. Nossos achados no CP1, portanto, reforçam o consenso científico atual sobre a importância do manejo da fertilidade química para a obtenção de altos rendimentos de soja.

Por outro lado, o segundo componente (CP2), que explicou 22,6% da variância, agrupou fortemente as características morfológicas da planta (altura e diâmetro) com os parâmetros diretos de produtividade (número de vagens, número de grãos e peso de grãos). A ACP mostrou que todas essas variáveis apresentaram correlação positiva de $r = 0,66$ ($p < 0,01$), sugerindo a existência de um eixo de crescimento relacionado ao porte da planta e a sua capacidade produtiva.

Este padrão indica que, nas condições deste estudo, um maior vigor vegetativo esteve associado a uma maior produtividade de grãos. Essa relação positiva entre arquitetura da planta e rendimento é frequentemente reportada em genótipos modernos de soja, onde o melhoramento genético tem buscado combinar porte adequado com alta eficiência

produtiva (Zhang et al., 2021). No entanto, a literatura científica alerta que essa relação nem sempre é direta.

O excessivo desenvolvimento vegetativo, especialmente em condições de alta fertilidade ou densidade de plantio, pode levar ao fenômeno conhecido como lodamento (acamamento) ou a um desbalanço no particionamento de fotoassimilados, onde a planta prioriza a massa foliar em detrimento do desenvolvimento de vagens e grãos (Liang et al., 2022; Severini et al., 2020). O fato de as correlações no CP2 terem sido positivas e de magnitude similar para todas as variáveis indica que, no ambiente estudado, não houve conflito evidente entre o crescimento vegetativo e o reprodutivo, possivelmente em razão do genótipo utilizado, do manejo empregado ou das condições ambientais favoráveis.

A integração dos resultados dos eixos 1 e 2 da ACP proporciona uma compreensão abrangente dos fatores que influenciam a produtividade da soja. Enquanto a fertilidade do solo, refletida pelos parâmetros químicos, é fundamental para o desenvolvimento das plantas, as características morfológicas também desempenham papel significativo na determinação do rendimento final. A combinação dessas variáveis oferece uma abordagem holística para o manejo da cultura, enfatizando a importância de práticas agrícolas que melhorem tanto a fertilidade do solo quanto a saúde das plantas.

A Análise de Agrupamento Hierárquico (HCA), realizada pelo método de Ward com base nas características físico-químicas dos solos, permitiu a formação de dois agrupamentos principais, dividindo os solos avaliados em grupos distintos (Figura 2).

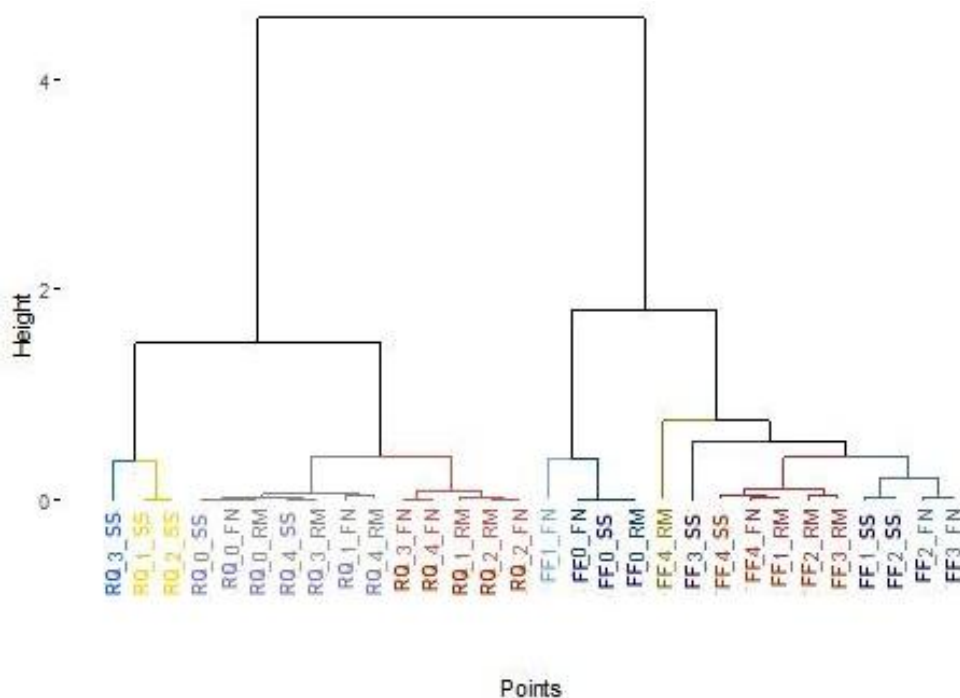


Figura 2. Análise de Agrupamento Hierárquico dos tratamentos utilizados em função dos solos avaliados.

Para o Neossolo Quartzarênico, a dose de 200% de adubação solúvel (13,33 g vaso⁻¹ de SS) se agrupou com a dose de 50% de fosfato natural (8,00 g vaso⁻¹) e com as doses de 150% (31,25 g vaso⁻¹) e 200% (41,67 g vaso⁻¹) de remineralizador.

Para o Plintossolo Pétrico, a dose de 200% de adubação solúvel (15,00 g vaso⁻¹ de SS) se agrupou com a dose de 200% de fosfato natural (36,00 g vaso⁻¹) e com as doses de 50% (11,72 g vaso⁻¹), 100%

(23,44 g vaso⁻¹) e 150% (35,16 g vaso⁻¹) de remineralizador.

A análise de correlação de Pearson evidenciou associação positiva entre altura de planta e diâmetro do colo ($r = 0,93$) e biomassa ($r = 0,68$). O número de vagens correlacionou-se fortemente com o número de grãos ($r = 0,99$) e com o peso de grãos ($r = 0,99$). Também foram verificadas correlações positivas entre CTC e SB ($r = 1$), Ca ($r = 0,94$) e Mg ($r = 0,93$) (Figura 3).

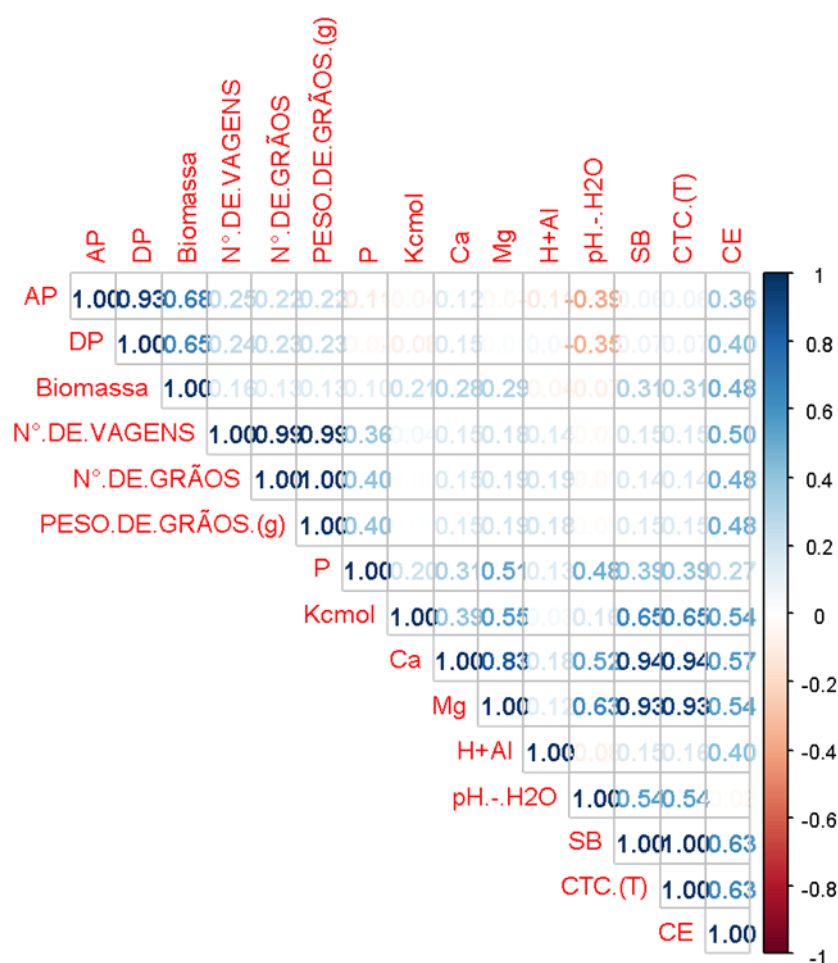


Figura 3. Matriz de correlação entre as variedades analisadas em função dos tratamentos utilizados e dos solos avaliados.

Esses resultados confirmam que plantas mais altas tendem a apresentar maior diâmetro e acúmulo de biomassa, o que está em consonância com a literatura que relaciona crescimento vegetativo robusto à maior interceptação de luz e aumento da fotossíntese (Liu et al., 2021; Purcell et al., 2002). Além disso, a correlação extremamente alta entre o número de vagens e o número e peso de grãos ($r = 0,99$) sugere que a capacidade produtiva da soja depende fortemente do desenvolvimento reprodutivo, resultado compatível com os achados de Egli (2010).

Outra correlação significativa foi observada entre a CTC e a SB ($r = 1$), bem como com os teores de Ca ($r = 0,94$) e Mg ($r = 0,93$). Esses resultados reforçam a importância da fertilidade do solo no fornecimento de cátions essenciais, confirmando que solos com maior CTC oferecem melhores condições nutricionais para o crescimento e produtividade (Havlin et al., 2013; Sposito, 2008). A correta

adubação, ao elevar a CTC, pode sustentar maior crescimento vegetativo e aumento da produção de grãos, especialmente em sistemas de plantio direto, onde a manutenção da fertilidade é essencial para a sustentabilidade (Reicosky & Saxton, 2007).

Tomando como base os aspectos físico-químicos dos solos e os indicadores de crescimento e produtividade da soja, a HCA agrupou os tratamentos em quatro clusters distintos (Figura 4). O uso de remineralizador em Plintossolo Pétrico, independentemente da dose, bem como as doses de 50% (11,72 g vaso⁻¹) e 150% (35,16 g vaso⁻¹) de remineralizador em Neossolo Quartzarênico, se agruparam com a aplicação de 150% de adubação solúvel (10,00 g vaso⁻¹ de SS no RQ) e 200% de fosfato natural (36,00 g vaso⁻¹ no FF), destacando concentrações mais elevadas de fósforo (Figura 4).

Similarmente, no Neossolo Quartzarênico, as doses de 50% (10,42 g vaso⁻¹) e 150% (31,25 g

vaso⁻¹) de remineralizador, bem como a dose de 150% de adubação solúvel (10,00 g vaso⁻¹ de SS), mostraram maior eficiência na disponibilização de fósforo. A adubação solúvel, embora forneça nutrientes imediatamente, demonstrou eficácia ampliada quando associada a remineralizadores, que liberam nutrientes gradualmente, reduzindo perdas por lixiviação (Resende et al., 2020). Além disso, a dose de 200% de fosfato natural (36,00 g vaso⁻¹) em Plintossolo Pétrico também se destacou, evidenciando a eficiência desse insumo em solos específicos.

Esses achados sugerem que remineralizadores, fosfato natural e adubação solúvel podem atuar de forma complementar para otimizar a disponibilidade de fósforo no solo, sendo que a escolha da melhor estratégia depende do tipo de solo e das condições locais. No Plintossolo Pétrico, a aplicação de remineralizadores e fosfato natural mostrou-se particularmente vantajosa, enquanto no Neossolo Quartzarênico, a integração de remineralizadores com adubação solúvel representou uma abordagem promissora para maximizar a nutrição da soja (Carvalho et al., 2018).

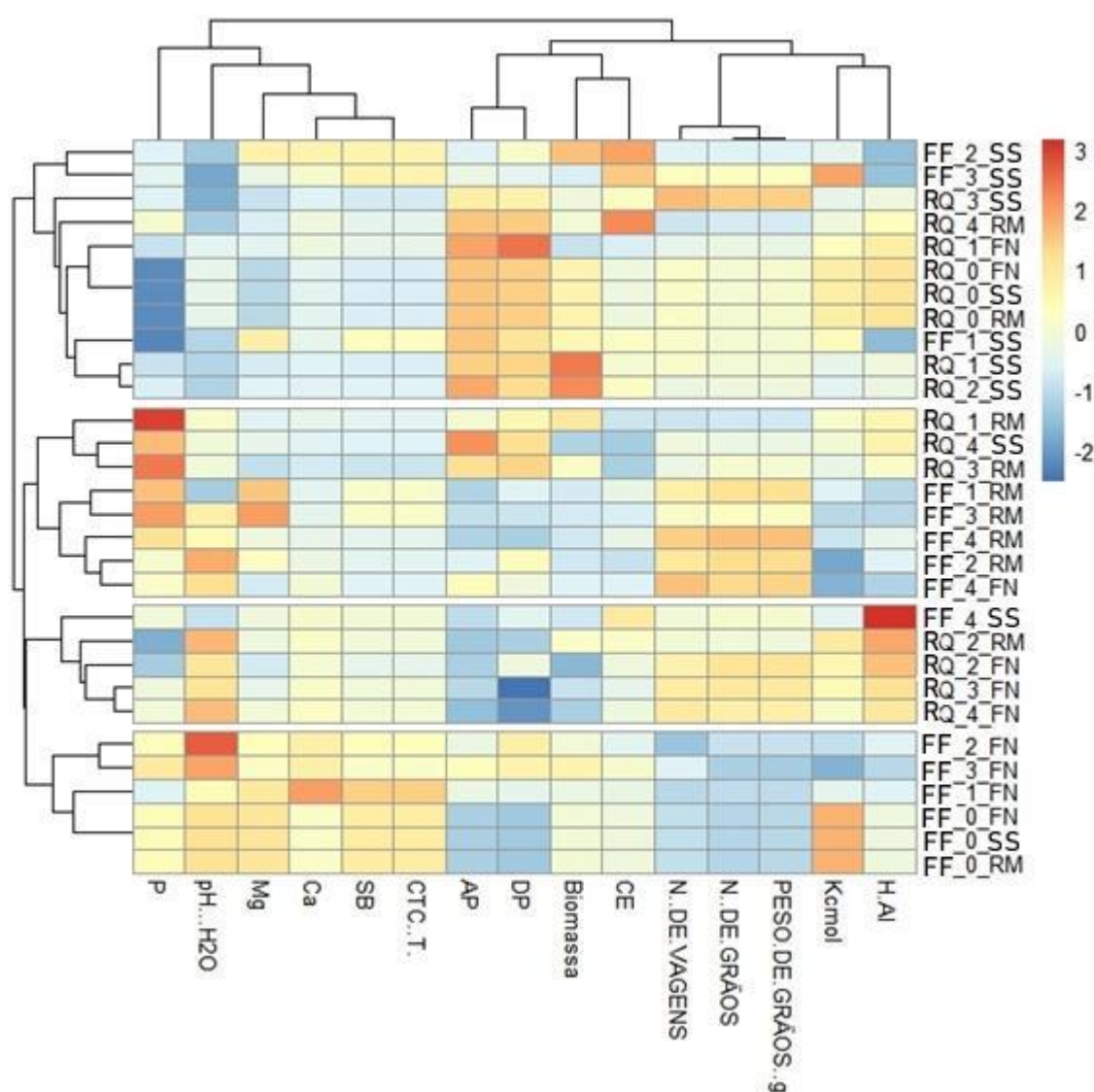


Figura 4. Análise de agrupamento hierárquico e mapa de calor com base em caracteres de crescimento e produção em função de fontes e doses de adubação fosfatada na cultura da soja em plantio direto em Neossolo Quartzarênico (RQ) e Plintossolo Pétrico (FF), no período de 112 dias após o plantio (ciclo total da cultura). As cores vermelha e azul representam a importância, da maior para a menor, respectivamente.

CONCLUSÃO

Referindo-se a adubação, a fonte de adubação solúvel (Super Simples) teve efeito positivo em desenvolvimento e crescimento de plantas, assim como na produtividade, apresentando resultados superiores aos obtidos com a aplicação das demais fontes de adubação, com destaque para os resultados obtidos na dose de 3 Mg ha⁻¹, tanto em sistema de cultivo convencional, quanto em plantio direto.

O remineralizador (RM) obteve resultados inferiores à fonte solúvel (SS) e ao Fosfato natural (FN). Em somente uma condição apresentou efeito positivo, com resposta ao desenvolvimento de planta em plantio direto, na dose de 1 Mg ha⁻¹.

O Fosfato natural por sua vez, embora tenha sido inferior em relação a fonte solúvel, obteve resultados superiores aos apresentados com o uso de remineralizador, o mesmo inferiu positivamente na produtividade e no desenvolvimento de planta a dose de 3 Mg ha⁻¹.

Com base nas análises realizadas, verifica-se que o uso do remineralizador e do fosfato natural pode ser adotado como fonte complementar para a fertilização do solo e a nutrição das plantas, porém não se mostrou viável como substituto dos fertilizantes solúveis, como o Super Simples.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6502: **Rochas e Solos – Terminologia**. Rio de Janeiro, 1995. 18p.

CAIONE, G.; LANGE, A.; BENETT, C. G. S.; FERNANDES, F. M. Fontes de fósforo para adubação de cana-de-açúcar forrageira no Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.41, n.1, p.66–73, 2011. <https://doi.org/10.5216/pat.v41i1.8497>

CARVALHO, M. C. S.; RESENDE, A. V.; CORRÊA, G. F.; CURI, N. Remineralizadores e bioestimulantes no crescimento e nutrição de soja em solo de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.42, 2018. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20170045>

CHERUBIN, M. R.; LOLLATO, R. P.; ROSE, C.; NOLLA, A.; MARQUES, J. Soil fertility management and crop yield in tropical systems: lessons from long-term experiments in Brazil.

Agronomy Journal, v.113, p. 4421–4438, 2021. <https://doi.org/10.1002/agj2.20874>

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **A soja no Brasil: safra 2022/2023**. Relatório Técnico. Brasília, 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>.

CRUZ, J. C.; ALVARENGA, R. C.; VIANA, J. H. M.; PEREIRA FILHO, I. A.; ALBUQUERQUE FILHO, M. R.; SANTANA, D. P. **Plantio Direto. Embrapa Milho e Sorgo**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/milho/producao/manejo-do-solo-e-adubacao/sistema-de-manejo-do-solo/plantio-direto>. Acesso em: julho 2024.

DERPSCH, R.; FRIEDRICH, T.; KASSAM, A.; LI, H. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v.3, n.1, 2010. <https://doi.org/10.3965/j.issn.1934-6344.2010.01.0-0>

EGLI, D. B. Soybean yield trends from 1972 to 2003 in Midwestern USA. **Field Crops Research**, v.106, n.1, p.53–59, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.10.014>

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. 416 p.

HAVLIN, J. L.; TISDALE, S. L.; NELSON, W. L.; BEATON, J. D. **Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management**. 8th ed. Pearson Education, 2013. ISBN 9780135033739.

HUNGRIA, M.; CAMPO, R. J.; MENDES, I. C.; GRAHAM, P. H. Contribution of biological nitrogen fixation to the N nutrition of grain crops in the tropics: the success of soybean (*Glycine max* L. Merr.) in South America. **Advances in Agronomy**, v.97, p.61–122, 2017. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(07\)97002-9](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(07)97002-9)

JUHÁSZ, A. C. P.; LANA, R. M. Q.; FERREIRA, A. O.; SILVA, J. Soil chemical attributes and soybean yield in the Brazilian Cerrado under no-till system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.44,

- e0200006, 2020.
<https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20200006>
- LIU, X.; JIN, J.; WANG, G.; HERBERT, S. J. Soybean yield physiology and development of high-yielding practices in Northeast China. **Field Crops Research**, v.105, n.3, p.157–171, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.09.001>
- MARTINS, E. S.; HARDOIM, P. R. Princípios geoquímicos, mineralógicos e biológicos do manejo de remineralizadores de solos. **Informe Agropecuário**, v.44, n.321, p.26-39, 2023.
- PURCELL, L. C.; BALL, R. A.; REAPER, J. D.; VORIES, E. D. Radiation use efficiency and biomass production in soybean at different plant population densities. **Crop Science**, v.42, p.172–177, 2002. <https://doi.org/10.2135/cropsci2002.1720>
- R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2023. Disponível em: <https://www.R-project.org/>.
- RAMOS, C. G.; QUEROL, X.; DALMORA, A. C. Potencial dos remineralizadores na agricultura: impacto no solo e produção vegetal. **Revista Brasileira de Geociências**, v.47, p.564–578, 2017. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2017473564578>
- REICOSKY, D. C.; SAXTON, K. E. The benefits of no-tillage. In: BAKER, C. J. et al. **No-tillage Seeding in Conservation Agriculture**. 2nd ed. FAO, 2007. ISBN 1-84593-116-5.
- RESENDE, A. V.; CURI, N.; CORRÊA, G. F. Adubação solúvel e remineralizadores: eficiência agronômica e impactos ambientais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.44, e0190186, 2020. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20190186>
- SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa Solos, 2013.
- SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa Solos, 2018.
- SANTOS, V. R. **Crescimento e produção de cana-de-açúcar em diferentes fontes de fósforo**. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2006.
- SECRETARIA DO PLANEJAMENTO E DA MODERNIZAÇÃO DA GESTÃO PÚBLICA (SEPLAN). **Atlas do Tocantins**. Palmas: SEPLAN, 2012. Disponível em: <https://www.to.gov.br/seplan/atlas-do-tocantins/1asvwxbj530d>.
- SPOSITO, G. **The Chemistry of Soils**. 2nd ed. Oxford University Press, 2008. <https://doi.org/10.1093/oso/9780190630881.001.0001>
- THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, v. 38, p. 55–94, 1948.
- ZHANG, H.; LI, Y.; CHEN, Y.; LIANG, J.; WANG, P. Canopy architecture and yield of soybean under different planting densities and row configurations. **Agronomy**, v.11, n.8, 1649, 2021. <https://doi.org/10.3390/agronomy11081649>