



UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDONÓPOLIS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

**CULTURAS DE COBERTURA EM PLANTIO DIRETO NA SOJA: PRODUÇÃO DE
FITOMASSA AÉREA E CICLAGEM DE NUTRIENTES**

THAÍS RODRIGUES MAGALHÃES GUEDES

RONDONÓPOLIS – MT

2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDONÓPOLIS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLÓGICAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

**CULTURAS DE COBERTURA EM PLANTIO DIRETO NA SOJA: PRODUÇÃO DE
FITOMASSA AÉREA E CICLAGEM DE NUTRIENTES**

THAÍS RODRIGUES MAGALHÃES GUEDES

Orientador: Prof. Dr. Leandro Pereira Pacheco
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Rondonópolis, Mato Grosso, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

RONDONÓPOLIS – MT
2025

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte

Ficha Catalográfica elaborada de forma automática com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.

G924c Guedes, Thaís Rodrigues Magalhães.
CULTURAS DE COBERTURA EM PLANTIO DIRETO NA
SOJA: PRODUÇÃO DE FITOMASSA AÉREA E CICLAGEM DE
NUTRIENTES [recurso eletrônico] / Thaís Rodrigues Magalhães
Guedes. – Dados eletrônicos (1 arquivo : 97 f., il. color., pdf). – 2025.

Orientador(a): Leandro Pereira Pacheco.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Rondonópolis,
Instituto de Ciências Agrárias e Tecnológicas, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Agrícola, Rondonópolis, 2025.

Inclui bibliografia.

1. *Urochloa ruziziensis*. 2. *Pennisetum glaucum*. 3. *Crotalaria spectabilis*. 4. *Cajanus cajan*. I. Pacheco, Leandro Pereira, *orientador*. II. Título.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDONÓPOLIS
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO: CULTURAS DE COBERTURA EM PLANTIO DIRETO NA SOJA: PRODUÇÃO DE FITOMASSA AÉREA E CICLAGEM DE NUTRIENTES

AUTORA: MESTRANDA **Thais Rodrigues Magalhães Guedes**

Dissertação defendida e aprovada em **30 de JUNHO de 2025**.

COMPOSIÇÃO DA BANCA EXAMINADORA

1. Prof. Dr. Leandro Pereira Pacheco (Presidente da Banca / orientador)

INSTITUIÇÃO: Universidade Federal de Rondonópolis

2. Profa. Dra. Niedja Marizze Cezar Alves (Membro Interno)

INSTITUIÇÃO: Universidade Federal de Rondonópolis

3. Prof. Dr. Carlos Eduardo Avelino Cabral (Membro Externo)

INSTITUIÇÃO: Universidade Federal de Rondonópolis

Rondonópolis, 30/06/2025.



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Eduardo Avelino Cabral, Docente - UFR**, em 30/06/2025, às 16:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Niedja Marizze Cezar Alves, Docente - UFR**, em 01/07/2025, às 11:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Leandro Pereira Pacheco, Docente - UFR**, em 02/07/2025, às 11:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufr.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0537552** e o código CRC **46EAE714**.

Referência: Processo nº 23853.008244/2025-61

SEI nº 0537552

A Deus, autor da vida, fonte de toda sabedoria e sustentação nos dias difíceis. A ele, que sempre esteve ao meu lado, em silêncio ou em providência, nos momentos de dúvida, cansaço e recomeço. Foi sua graça que me fortaleceu, sua luz que me guiou, e seu amor que me manteve firme até aqui. Toda honra, toda glória e toda gratidão pertencem a Ti. “Não se cansarão de fazer o bem, pois no tempo certo colherão, se não desistirem.” (Gálatas 6:9)

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por ser minha fonte de força, sabedoria e coragem em todos os momentos desta jornada. Sua presença me sustentou nos desafios e iluminou meu caminho nas conquistas.

À minha mãe, Jussara Christine, exemplo de amor incondicional, resiliência e dedicação. Sua fé, apoio e encorajamento foram fundamentais para que eu pudesse chegar até aqui. Estendo minha gratidão a toda a minha família, pelo carinho, compreensão e suporte constantes.

Ao meu companheiro, Sidnei Bastos, pelo incentivo diário, pela paciência e por estar ao meu lado nos momentos mais difíceis e decisivos dessa caminhada. Seu apoio foi essencial para que eu não desistisse.

Ao Grupo de Pesquisa e Inovação em Sistemas Puros e Integrados de Produção Agropecuária (GPISI), do qual faço parte desde a graduação, deixo meu sincero agradecimento por todo o aprendizado, pelas amizades construídas e pelas oportunidades que contribuíram para meu crescimento acadêmico e pessoal.

Ao meu orientador, professor Leandro Pereira Pacheco, pela orientação dedicada, pelas valiosas contribuições científicas e pela confiança depositada em meu trabalho. Sua mentoria foi fundamental para a realização desta dissertação.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Rondonópolis, pela oportunidade de formação, pelo suporte acadêmico e institucional, e pelo ambiente de estímulo à pesquisa e à construção do conhecimento.

Agradeço também a todos que, de alguma forma, contribuíram para minha trajetória no mestrado, sejam colegas, professores, técnicos ou colaboradores, cada gesto, palavra e apoio fizeram a diferença.

*“O Senhor é a minha força e o meu escudo; nele o meu coração confia, e dele recebo ajuda.”
(Salmos 28:7)*

RESUMO

A busca por maior eficiência e sustentabilidade na agricultura tem impulsionado a adoção de estratégias que otimizem o uso de culturas de cobertura no sistema de plantio direto. Assim, objetivou-se com presente estudo avaliar o potencial das culturas de cobertura cultivadas em segunda safra, através da ciclagem de nutrientes, produção de fitomassa e produtividade da soja cultivada em sucessão. Esta dissertação foi estruturada em dois capítulos complementares, os quais investigam, por diferentes abordagens, os efeitos do uso de culturas de cobertura. O Capítulo I apresenta uma meta-análise de estudos conduzidos no Brasil entre 2010 e 2025, abrangendo os biomas Cerrado e Cerrado nordestino. A análise foi baseada em dados padronizados (SMD) e modelos de efeitos aleatórios, o que permite avaliar o impacto das culturas de cobertura sobre a produção de fitomassa aérea, ciclagem de nutrientes (N, P, K, Ca e Mg) e produtividade da soja. Além disso, foi realizado a classificação funcional das espécies (gramíneas, leguminosas e consórcios). Os resultados da meta-análise apontaram benefícios significativos na ciclagem de nutrientes, especialmente com o uso de gramíneas como *Urochloa ruziziensis* e *Pennisetum glaucum* e leguminosas como *Crotalaria spectabilis*. No Capítulo II investigou-se, por meio de experimento de campo conduzido na Universidade Federal de Rondonópolis nas safras 2022/23 e 2023/24, os efeitos da roçagem mecânica sobre culturas de cobertura implantadas na segunda safra. Os tratamentos foram definidos da seguinte forma: T1: *Crotalaria spectabilis* + *Pennisetum glaucum* + *Urochloa ruziziensis* + *Cajanus cajan* sem roçagem mecânica; T2: *Crotalaria spectabilis* + *Pennisetum glaucum* + *Urochloa ruziziensis* + *Cajanus cajan* com roçagem mecânica; T3: *Urochloa ruziziensis* sem roçagem mecânica; T4: *Urochloa ruziziensis* com roçagem mecânica. Os resultados demonstraram que a roçagem induziu a rebrotação das gramíneas, favorecendo o acúmulo de massa seca de raízes (MSR) na camada superficial do solo (0,00–0,05 m), com aumentos de 119% (T4) e 158% (T2) em comparação aos respectivos controles. Embora o consórcio sem roçagem (T1) tenha produzido a maior quantidade de fitomassa aérea (7410,6 kg ha⁻¹), o tratamento roçado (T2) foi o mais eficiente na ciclagem de nutrientes, acumulando maiores teores de N, P, K e Ca. Quanto a produtividade da soja em sucessão, os tratamentos T1 (3416,4 kg ha⁻¹), T2 (3511,7 kg ha⁻¹) e T4 (3346,8 kg ha⁻¹) apresentaram os melhores resultados.

Palavras-chave: *Urochloa ruziziensis*, *Pennisetum glaucum*, *Crotalaria spectabilis*, *Cajanus cajan*.

ABSTRACT

The quest for greater efficiency and sustainability in agriculture has driven the adoption of strategies that optimize the use of cover crops in no-tillage systems. Therefore, the objective of this study was to evaluate the potential of cover crops grown in second harvests through nutrient cycling, phytomass production, and productivity of soybean grown in succession. This dissertation is structured in two complementary chapters, which investigate, using different approaches, the effects of cover crop use. Chapter I presents a meta-analysis of studies conducted in Brazil between 2010 and 2025, covering the Cerrado and Northeastern Cerrado biomes. The analysis was based on standardized data (SMD) and random-effects models, which allows us to assess the impact of cover crops on aboveground phytomass production, nutrient cycling (N, P, K, Ca, and Mg), and soybean productivity. Furthermore, a functional classification of the species (grasses, legumes, and intercrops) was performed. The results of the meta-analysis indicated significant benefits in nutrient cycling, especially with the use of grasses such as *Urochloa ruziziensis* and *Pennisetum glaucum* and legumes such as *Crotalaria spectabilis*. Chapter II investigated, through a field experiment conducted at the Federal University of Rondonópolis in the 2022/23 and 2023/24 harvest seasons, the effects of mechanical mowing on cover crops planted in the second harvest. The treatments were defined as follows: T1: *Crotalaria spectabilis* + *Pennisetum glaucum* + *Urochloa ruziziensis* + *Cajanus cajan* without mechanical mowing; T2: *Crotalaria spectabilis* + *Pennisetum glaucum* + *Urochloa ruziziensis* + *Cajanus cajan* with mechanical mowing; T3: *Urochloa ruziziensis* without mechanical mowing; T4: *Urochloa ruziziensis* with mechanical mowing. The results demonstrated that mowing induced grass regrowth, favoring the accumulation of root dry mass (RDM) in the surface soil layer (0.00–0.05 m), with increases of 119% (T4) and 158% (T2) compared to the respective controls. Although the intercrop without mowing (T1) produced the largest amount of aboveground phytomass (7410.6 kg ha⁻¹), the mowed treatment (T2) was the most efficient in nutrient cycling, accumulating higher levels of N, P, K, and Ca. Regarding soybean productivity in succession, treatments T1 (3416.4 kg ha⁻¹), T2 (3511.7 kg ha⁻¹), and T4 (3346.8 kg ha⁻¹) presented the best results.

Keywords: *Urochloa ruziziensis*, *Pennisetum glaucum*, *Crotalaria spectabilis*, *Cajanus cajan*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Forest plot da meta-análise sobre o efeito das culturas de cobertura na variável nitrogênio, considerando o subgrupo gramíneas, em comparação ao tratamento controle. A medida de efeito utilizada foi a SMD (Standardized Mean Difference), que representa a diferença de médias padronizada entre os grupos. Os valores de SE (SMD) correspondem ao erro padrão associado a cada estimativa individual. O modelo estatístico adotado foi de efeitos aleatórios, com intervalo de confiança de 95% para cada estudo e para o efeito combinado. .39

Figura 2: *Forest plot* da meta-análise sobre o efeito das culturas de cobertura na variável nitrogênio, considerando o subgrupo leguminosas, em comparação ao tratamento controle. A medida de efeito utilizada foi a SMD (Standardized Mean Difference), que representa a diferença de médias padronizada entre os grupos. Os valores de SE (SMD) correspondem ao erro padrão associado a cada estimativa individual. O modelo estatístico adotado foi de efeitos aleatórios, com intervalo de confiança de 95% para cada estudo e para o efeito combinado. .40

Figura 3: Forest plot da meta-análise sobre o efeito das culturas de cobertura na variável nitrogênio, considerando o subgrupo consórcios, em comparação ao tratamento controle. A medida de efeito utilizada foi a SMD (Standardized Mean Difference), que representa a diferença de médias padronizada entre os grupos. Os valores de SE (SMD) correspondem ao erro padrão associado a cada estimativa individual. O modelo estatístico adotado foi de efeitos aleatórios, com intervalo de confiança de 95% para cada estudo e para o efeito combinado. .41

Figura 4: Forest plot da meta-análise sobre o efeito das culturas de cobertura na variável fósforo, considerando o subgrupo gramíneas, em comparação ao tratamento controle. A medida de efeito utilizada foi a SMD (Standardized Mean Difference), que representa a diferença de médias padronizada entre os grupos. Os valores de SE (SMD) correspondem ao erro padrão associado a cada estimativa individual. O modelo estatístico adotado foi de efeitos aleatórios, com intervalo de confiança de 95% para cada estudo e para o efeito combinado.42

Figura 5: Forest plot da meta-análise sobre o efeito das culturas de cobertura na variável fósforo, considerando o subgrupo leguminosas, em comparação ao tratamento controle. A medida de efeito utilizada foi a SMD (Standardized Mean Difference), que representa a diferença de médias padronizada entre os grupos. Os valores de SE (SMD) correspondem ao erro padrão associado a cada estimativa individual. O modelo estatístico adotado foi de efeitos aleatórios, com intervalo de confiança de 95% para cada estudo e para o efeito combinado. .43

Figura 6: Forest plot da meta-análise sobre o efeito das culturas de cobertura na variável fósforo, considerando o subgrupo consórcios, em comparação ao tratamento controle. A medida

de efeito utilizada foi a SMD (Standardized Mean Difference), que representa a diferença de médias padronizada entre os grupos. Os valores de SE (SMD) correspondem ao erro padrão associado a cada estimativa individual. O modelo estatístico adotado foi de efeitos aleatórios, com intervalo de confiança de 95% para cada estudo e para o efeito combinado.44

Figura 7: Forest plot da meta-análise sobre o efeito das culturas de cobertura na variável potássio, considerando o subgrupo gramíneas, em comparação ao tratamento controle. A medida de efeito utilizada foi a SMD (Standardized Mean Difference), que representa a diferença de médias padronizada entre os grupos. Os valores de SE (SMD) correspondem ao erro padrão associado a cada estimativa individual. O modelo estatístico adotado foi de efeitos aleatórios, com intervalo de confiança de 95% para cada estudo e para o efeito combinado. .45

Figura 8: Forest plot da meta-análise sobre o efeito das culturas de cobertura na variável potássio, considerando o subgrupo leguminosas, em comparação ao tratamento controle. A medida de efeito utilizada foi a SMD (Standardized Mean Difference), que representa a diferença de médias padronizada entre os grupos. Os valores de SE (SMD) correspondem ao erro padrão associado a cada estimativa individual. O modelo estatístico adotado foi de efeitos aleatórios, com intervalo de confiança de 95% para cada estudo e para o efeito combinado. .46

Figura 9: – Forest plot da meta-análise sobre o efeito das culturas de cobertura na variável potássio, considerando o subgrupo consórcios, em comparação ao tratamento controle. A medida de efeito utilizada foi a SMD (Standardized Mean Difference), que representa a diferença de médias padronizada entre os grupos. Os valores de SE (SMD) correspondem ao erro padrão associado a cada estimativa individual. O modelo estatístico adotado foi de efeitos aleatórios, com intervalo de confiança de 95% para cada estudo e para o efeito combinado. .47

Figura 10: Forest plot da meta-análise sobre o efeito das culturas de cobertura na variável cálcio, considerando o subgrupo gramíneas, em comparação ao tratamento controle. A medida de efeito utilizada foi a SMD (Standardized Mean Difference), que representa a diferença de médias padronizada entre os grupos. Os valores de SE (SMD) correspondem ao erro padrão associado a cada estimativa individual. O modelo estatístico adotado foi de efeitos aleatórios, com intervalo de confiança de 95% para cada estudo e para o efeito combinado.48

Figura 11: Forest plot da meta-análise sobre o efeito das culturas de cobertura na variável cálcio, considerando o subgrupo leguminosas, em comparação ao tratamento controle. A medida de efeito utilizada foi a SMD (Standardized Mean Difference), que representa a diferença de médias padronizada entre os grupos. Os valores de SE (SMD) correspondem ao erro padrão associado a cada estimativa individual. O modelo estatístico adotado foi de efeitos aleatórios, com intervalo de confiança de 95% para cada estudo e para o efeito combinado. .49

Figura 12: Forest plot da meta-análise sobre o efeito das culturas de cobertura na variável cálcio, considerando o subgrupo consórcios, em comparação ao tratamento controle. A medida de efeito utilizada foi a SMD (Standardized Mean Difference), que representa a diferença de médias padronizada entre os grupos. Os valores de SE (SMD) correspondem ao erro padrão associado a cada estimativa individual. O modelo estatístico adotado foi de efeitos aleatórios, com intervalo de confiança de 95% para cada estudo e para o efeito combinado.50

Figura 13: Forest plot da meta-análise sobre o efeito das culturas de cobertura na variável magnésio, considerando o subgrupo gramíneas, em comparação ao tratamento controle. A medida de efeito utilizada foi a SMD (Standardized Mean Difference), que representa a diferença de médias padronizada entre os grupos. Os valores de SE (SMD) correspondem ao erro padrão associado a cada estimativa individual. O modelo estatístico adotado foi de efeitos aleatórios, com intervalo de confiança de 95% para cada estudo e para o efeito combinado. .51

Figura 14: Forest plot da meta-análise sobre o efeito das culturas de cobertura na variável magnésio, considerando o subgrupo leguminosas, em comparação ao tratamento controle. A medida de efeito utilizada foi a SMD (Standardized Mean Difference), que representa a diferença de médias padronizada entre os grupos. Os valores de SE (SMD) correspondem ao erro padrão associado a cada estimativa individual. O modelo estatístico adotado foi de efeitos aleatórios, com intervalo de confiança de 95% para cada estudo e para o efeito combinado. .52

Figura 15: Forest plot da meta-análise sobre o efeito das culturas de cobertura na variável magnésio, considerando o subgrupo consórcios, em comparação ao tratamento controle. A medida de efeito utilizada foi a SMD (Standardized Mean Difference), que representa a diferença de médias padronizada entre os grupos. Os valores de SE (SMD) correspondem ao erro padrão associado a cada estimativa individual. O modelo estatístico adotado foi de efeitos aleatórios, com intervalo de confiança de 95% para cada estudo e para o efeito combinado. .53

Figura 16: Forest plot da meta-análise sobre o efeito das culturas de cobertura na variável fitomassa aérea, considerando o subgrupo gramíneas, em comparação ao tratamento controle. A medida de efeito utilizada foi a SMD (Standardized Mean Difference), que representa a diferença de médias padronizada entre os grupos. Os valores de SE (SMD) correspondem ao erro padrão associado a cada estimativa individual. O modelo estatístico adotado foi de efeitos aleatórios, com intervalo de confiança de 95% para cada estudo e para o efeito combinado. .54

Figura 17: Forest plot da meta-análise sobre o efeito das culturas de cobertura na variável fitomassa aérea, considerando o subgrupo leguminosas, em comparação ao tratamento controle. A medida de efeito utilizada foi a SMD (Standardized Mean Difference), que representa a diferença de médias padronizada entre os grupos. Os valores de SE (SMD) correspondem ao

erro padrão associado a cada estimativa individual. O modelo estatístico adotado foi de efeitos aleatório, com intervalo de confiança de 95% para cada estudo e para o efeito combinado. ...55

Figura 18: Forest plot da meta-análise sobre o efeito das culturas de cobertura na variável fitomassa aérea, considerando o subgrupo consórcios, em comparação ao tratamento controle. A medida de efeito utilizada foi a SMD (Standardized Mean Difference), que representa a diferença de médias padronizada entre os grupos. Os valores de SE (SMD) correspondem ao erro padrão associado a cada estimativa individual. O modelo estatístico adotado foi de efeitos aleatórios, com intervalo de confiança de 95% para cada estudo e para o efeito combinado. .55

Figura 19: Forest plot da meta-análise sobre o efeito das culturas de cobertura na variável produtividade da soja, considerando o subgrupo gramíneas, em comparação ao tratamento controle. A medida de efeito utilizada foi a SMD (Standardized Mean Difference), que representa a diferença de médias padronizada entre os grupos. Os valores de SE (SMD) correspondem ao erro padrão associado a cada estimativa individual. O modelo estatístico adotado foi de efeitos aleatórios, com intervalo de confiança de 95% para cada estudo e para o efeito combinado.56

Figura 20: Forest plot da meta-análise sobre o efeito das culturas de cobertura na variável produtividade da soja, considerando o subgrupo leguminosas, em comparação ao tratamento controle. A medida de efeito utilizada foi a SMD (Standardized Mean Difference), que representa a diferença de médias padronizada entre os grupos. Os valores de SE (SMD) correspondem ao erro padrão associado a cada estimativa individual. O modelo estatístico adotado foi de efeitos aleatórios, com intervalo de confiança de 95% para cada estudo e para o efeito combinado.57

Figura 21: Forest plot da meta-análise sobre o efeito das culturas de cobertura na variável produtividade da soja, considerando o subgrupo consórcios, em comparação ao tratamento controle. A medida de efeito utilizada foi a SMD (Standardized Mean Difference), que representa a diferença de médias padronizada entre os grupos. Os valores de SE (SMD) correspondem ao erro padrão associado a cada estimativa individual. O modelo estatístico adotado foi de efeitos aleatórios, com intervalo de confiança de 95% para cada estudo e para o efeito combinado.58

Figura 22: Representação gráfica do local do experimento realizado em Rondonópolis, MT, safras 2022/23 e 2023/24. Fonte: Autoria própria (2023)73

Figura 23: Climograma das variáveis meteorológicas registradas ao longo do período de realização do experimento, em Rondonópolis, MT, safras 2022/23 e 2023/24.74

Figura 25: Corte realizado nas culturas de cobertura por meio da roçagem mecânica. Fonte:

Autoria própria (2023).....	76
Figura 26: Semeadura da soja durante o período da safra. Fonte: Autoria própria (2023)	77
Figura 28: Coleta de raízes (A); representação das áreas de coleta de massa seca de raízes (B). Fonte: Autoria própria (2023).....	78
Figura 29: Amostra de solo contendo massa seca de raízes (profundidade 0 – 5 cm). Fonte: Autoria própria (2023).....	78
Figura 30: Coleta de MSPA no dia da roçagem mecânica (com altura de 0,25 m do solo) (A); coleta de MSPA aos 105 dias após a roçagem mecânica (B). Fonte: Autoria própria (2023) .	79
Figura 31: Massa seca de raízes (MSR) produzida por culturas de cobertura na segunda safra (média de dois anos)..	81
Figura 32: Acúmulo de massa seca da parte aérea (MSPA) por culturas anuais e de cobertura, durante a senescência das culturas, na segunda safra (média de dois anos).....	82
Figura 33: Acúmulo de N, P, K, Ca e Mg por culturas anuais e de cobertura, durante a senescência das culturas, na segunda safra durante (média de dois anos).....	83
Figura 34: Acúmulo, liberação e tempo de meia vida ($T_{1/2}$) do N, P, K, Ca e Mg, proveniente das culturas anuais e de cobertura.....	84
Figura 35: Produtividade da soja cultivada em sucessão as culturas anuais de cobertura, nas safras 2022/23 e 2023/24 (média de dois anos).	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Termos aplicados no campo de busca nas bases de dados por título, resumo ou palavras-chaves.	33
Tabela 2: Matriz dos estudos, locais e variáveis que forneceram os dados para as meta-análises.	35
Tabela 3: Espécies de culturas de cobertura e respectivos estudos em que apresentaram os maiores impactos positivos nas variáveis analisadas (acúmulo de nutrientes, produção de fitomassa aérea e produtividade da soja), conforme resultados da meta-análise.	59
Tabela 4: Caracterização química e textural do Latossolo Vermelho Distrófico na abertura da área para o experimento em 2013.....	74
Tabela 5: Caracterização dos tratamentos implementados na segunda safra em sistema plantio direto.....	75

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL.....	18
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	21
2.1	Sistema plantio direto e culturas de cobertura.....	21
2.2	Roçagem mecânica como estratégia de potencializar as culturas de cobertura em plantio direto.....	23
2.3	Meta-análise na agricultura.....	27
3	CAPÍTULO I: Culturas de cobertura sobre a ciclagem de nutrientes, fitomassa aérea e produtividade da soja em sistema plantio direto: uma meta-análise.....	29
4	INTRODUÇÃO.....	31
5	MATERIAL E MÉTODOS.....	33
5.1	Busca sistemática.....	33
5.2	Análise estatística da meta-análise.....	35
6	Resultados.....	38
6.1	Nitrogênio.....	38
6.2	Fósforo.....	41
6.3	Potássio.....	44
6.4	Cálcio.....	47
6.5	Magnésio.....	50
6.6	Fitomassa aérea.....	53
6.7	Produtividade da soja.....	56
7	DISCUSSÃO.....	60
8	CONCLUSÃO.....	64
	REFERÊNCIAS.....	65
9	CAPÍTULO II: Roçagem mecânica em culturas de cobertura no sistema plantio direto como estratégia para produção de fitomassa aérea e radicular.....	69
10	INTRODUÇÃO.....	71
11	MATERIAL E MÉTODOS.....	73
11.1	Caracterização da área de estudo.....	73
11.2	Delineamento experimental.....	75
11.3	Variáveis analisadas.....	77
11.4	Análise estatística.....	80
12	RESULTADOS.....	81
13	DISCUSSÃO.....	86
13.1	Massa seca de raízes e parte aérea.....	86
13.2	Acúmulo e liberação de nutrientes por meio das culturas de cobertura.....	88
13.3	Produtividade da soja.....	89

14 CONCLUSÃO	91
REFERÊNCIAS	92
APÊNCICE A	100

1 INTRODUÇÃO GERAL

A agricultura brasileira tem experimentado avanços expressivos impulsionados pela mecanização, biotecnologia e pela expansão de práticas sustentáveis. Dentro desse contexto, o país se consolidou entre os maiores produtores mundiais de grãos, tendo a soja como principal cultura de exportação. Para a safra 2024/25, estima-se uma produção nacional de mais de 166 milhões de toneladas de soja, um crescimento de 12,4% em relação ao ciclo anterior, com o Cerrado despontando como principal área de expansão da oleaginosa (Conab, 2025). O estado de Mato Grosso lidera essa produção, atingindo um volume recorde de 49,62 milhões de toneladas na mesma safra, o que representa um aumento de 27,05% (Conab, 2025).

Embora essa produtividade reflita avanços tecnológicos e estratégias eficientes de cultivo, ela está fortemente sustentada por sistemas de produção baseados na sucessão simples de soja e milho, com baixa diversificação de espécies ao longo dos anos. A repetição anual dessas culturas, especialmente em regiões de alta pressão produtiva como o Cerrado mato-grossense, tem gerado impactos negativos cumulativos sobre o solo, como compactação, perda de matéria orgânica, baixa fertilidade do solo e redução da atividade microbiológica (Silva *et al.*, 2022; Ozório *et al.*, 2024). Esses efeitos afetam diretamente a fertilidade e a estrutura física do solo, tornando os sistemas mais vulneráveis a eventos climáticos extremos, como estiagens e chuvas intensas, além de comprometerem sua resiliência a longo prazo.

A problemática da monocultura e baixa diversidade funcional dos sistemas agrícolas tem sido amplamente debatida pela comunidade científica, sobretudo no que diz respeito à degradação da qualidade do solo (Simon *et al.*, 2022; Valani *et al.*, 2022; Pinto *et al.*, 2022). Nesse contexto, práticas conservacionistas como o sistema plantio direto (SPD) têm sido adotadas como alternativas para conter esse processo. Quando bem manejado, o SPD promove a manutenção da cobertura do solo, com mínimo revolvimento e a rotação de culturas, vem sendo reconhecido por sua contribuição à sustentabilidade e à produtividade agrícola em áreas tropicais (Timm *et al.*, 2024).

Entretanto, para que o SPD alcance maior eficiência e atue efetivamente na reversão dos impactos causados pela sucessão contínua de soja e milho, é necessário incorporar práticas complementares que fortaleçam sua base técnica. Uma dessas estratégias é o uso de diversidade de culturas de cobertura na segunda safra, que tem ganhado destaque por sua capacidade de melhorar atributos físicos, químicos e biológicos do solo (Beutler *et al.*, 2024; Denardin *et al.*, 2025). A diversidade de espécies utilizadas em sistemas consorciados contribui para a quebra do ciclo da monocultura, para o aumento da ciclagem de nutrientes e para a formação de palhada

mais persistente e de qualidade, com impacto direto sobre a fertilidade e a conservação do solo.

Apesar do potencial das culturas de cobertura, seu uso ainda é limitado no Brasil, sendo comum a substituição da segunda safra por milho. A inserção de espécies como crotalária, milheto, braquiária e feijão-guandu consorciadas no período da segunda safra representa uma alternativa eficiente para ampliar a diversidade funcional do sistema, melhorar a ciclagem de nutrientes e aumentar a estabilidade do solo (Pacheco *et al.*, 2018; Dalla Côt *et al.*, 2021). Estudos recentes demonstram que consórcios entre gramíneas e leguminosas podem elevar significativamente a produtividade da soja cultivada em sucessão, como observado por Denardin *et al.* (2025), que reportaram aumentos de até 28% no rendimento da oleaginosa.

Embora muitos estudos tenham documentado vários benefícios das culturas de cobertura, existem muitos resultados distintos em áreas sob SPD devido à ampla variabilidade climática e fragilidade desses sistemas (Garba *et al.*, 2022). Com isso, a meta-análise se apresenta como uma ferramenta estratégica para consolidar evidências científicas geradas em diferentes regiões, solos, manejos e espécies, permitindo a identificação de padrões mais robustos e orientações práticas e confiáveis. Ao integrar os resultados de múltiplos estudos, supõe-se que essa abordagem poderá reduzir a incerteza associada aos efeitos isolados e possibilitar avaliar, de forma quantitativa (Borenstein *et al.*, 2021; Paulo; Barari, 2022), o impacto real das culturas de cobertura sobre variáveis-chave como a ciclagem de nutrientes, a produção de fitomassa e produtividade da soja. A partir dessas evidências, podemos ampliar o uso e promover a diversificação de espécies durante a segunda safra e promover novas técnicas.

Além da diversificação de espécies, o manejo adequado da fitomassa gerada pelas culturas de cobertura é determinante para o sucesso do SPD (Pacheco *et al.*, 2011; Dalla Côt *et al.*, 2021). Nesse sentido, a roçagem mecânica surge como uma prática inovadora, que pode ampliar os benefícios da cobertura do solo. Essa técnica consiste na fragmentação (corte) da parte aérea das plantas, acelerando a decomposição da palhada, promovendo a liberação de nutrientes como nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio, e estimulando a rebrotação aérea e radicular das culturas de cobertura. Como isso, presume-se que há maior acúmulo de matéria orgânica no solo, intensificação da atividade microbiológica e formação de bioporos, que favorecem o enraizamento profundo da cultura em sucessão (Garland *et al.*, 2017; Redin *et al.*, 2016; Balbinot Junior *et al.*, 2017).

Portanto, práticas como a roçagem mecânica associadas à diversidade de culturas de cobertura no SPD têm o potencial de transformar sistemas produtivos baseados na monocultura, tornando-os mais eficientes, resilientes e ambientalmente sustentáveis. A adoção de arranjos vegetais diversificados e manejos que favoreçam a ciclagem de nutrientes contribuem para a

melhoria da qualidade do solo, manutenção da produtividade (Dalla Côt *et al.*, 2021) e redução da dependência de insumos externos.

Assim, este trabalho justifica-se pela necessidade de gerar evidências científicas quantitativas sobre os efeitos das culturas de cobertura no SPD, por meio de uma meta-análise, e avaliar experimentalmente como a roçagem mecânica, integrada à diversificação de espécies, pode potencializar os benefícios supracitados, ampliando a eficiência e a sustentabilidade em SPD.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Sistema plantio direto e culturas de cobertura

O estado do Mato Grosso é o líder nacional na produção de grãos, devido ao seu clima propício, solos bem adaptados e topografia favorável com grandes extensões de terras agricultáveis, fez com que o estado se consolidasse como o principal polo do agronegócio brasileiro. Em que, permite a implementação de um modelo de produção altamente mecanizado, aliado ao uso de tecnologias como a agricultura de precisão, onde tem garantido elevados índices de produtividade, permitindo ao estado se manter na vanguarda do setor. Entretanto, os principais sistemas utilizados estão na sucessão com baixa diversidade florística, tendo a soja e o milho como culturas predominantes (Guiducci e Hiroshi Hirakuri, 2021), sendo a soja o “carro-chefe” do estado.

A busca por sistemas agrícolas mais eficientes e sustentáveis tem levado a um crescente interesse pela diversificação funcional das culturas de cobertura no SPD, especialmente em regiões tropicais como o Cerrado brasileiro (Silva *et al.*, 2021, Wulanningtyas *et al.*, 2021). O SPD tem se consolidado como uma das principais estratégias de manejo sustentável do solo na agricultura moderna, especialmente em países de clima tropical como o Brasil. Baseado em três princípios fundamentais: ausência de revolvimento do solo, cobertura permanente com resíduos vegetais e rotação de culturas, o SPD promove a conservação da estrutura física do solo, reduz a erosão hídrica e eólica, e contribui para o aumento da matéria orgânica (Silva *et al.*, 2021; Chaveiro *et al.*, 2022). Esses fatores são essenciais para manter e melhorar a fertilidade do solo, garantindo maior eficiência na absorção de água e nutrientes pelas culturas. Como resultado, o SPD proporciona maior estabilidade produtiva, mesmo sob condições climáticas adversas, sendo amplamente adotado em áreas destinadas à produção de grãos, como a soja (Silva *et al.*, 2023).

Além dos benefícios agronômicos, o SPD também desempenha um papel relevante na sustentabilidade ambiental dos sistemas agrícolas. Ao minimizar a exposição do solo e manter resíduos vegetais na superfície, o sistema contribui para o sequestro de carbono, melhora a atividade biológica do solo e reduz a emissão de gases de efeito estufa (Silva *et al.*, 2021). A rotação de culturas, outro princípio-chave do SPD, permite a diversificação do sistema produtivo, reduzindo a incidência de pragas e doenças e melhorando a ciclagem de nutrientes.

Dessa forma, o SPD favorece o aumento da produtividade de grãos, ao mesmo tempo

em que promove a conservação dos recursos naturais e a viabilidade econômica dos sistemas agrícolas. Dentro desse contexto, o consórcio de espécies vegetais na segunda safra, combinando gramíneas, leguminosas e outras plantas com funções complementares, representa uma estratégia emergente para promover melhorias no solo e, conseqüentemente, otimizar o desempenho da soja cultivada em sucessão (Timm *et al.*, 2024).

Ao contrário do cultivo solteiro, o consórcio de culturas de cobertura gera interações ecológicas sinérgicas, que ampliam os benefícios agroecológicos do SPD. Gramíneas como o milho (*Pennisetum glaucum*) e a braquiária (*Urochloa ruziziensis*) fornecem elevada produção de biomassa com lenta decomposição, favorecendo a formação de cobertura duradoura, redução da temperatura do solo e conservação da umidade (Pacheco *et al.*, 2011; Dalla Côt *et al.*, 2021). Já leguminosas como *Crotalaria spp.* e *Cajanus cajan* promovem a fixação biológica de nitrogênio (FBN) e liberam nutrientes rapidamente, graças à menor relação C/N e ao alto teor de compostos nitrogenados em seus tecidos (Dalla Côt *et al.*, 2021). A junção dessas características num sistema consorciado permite uma liberação sincronizada e gradual de nutrientes, o que tem mostrado efeito direto sobre o crescimento, a nutrição e o rendimento da soja em sucessão.

Estudos recentes têm demonstrado que sistemas com mix de culturas aumentam significativamente o acúmulo de nutrientes como N, P, K, Ca e Mg na fitomassa aérea, além de favorecerem a estruturação física do solo e a porosidade radicular, criando um ambiente mais favorável à emergência e ao desenvolvimento inicial da soja (Dalla Côt *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2023). Além disso, os diferentes sistemas radiculares exploram distintos compartimentos do perfil do solo, promovendo a redistribuição vertical de nutrientes e o resgate de elementos lixiviados em profundidade, os quais tornam-se acessíveis para a cultura principal após a decomposição dos resíduos vegetais (Silva *et al.*, 2022). Isso representa uma estratégia de ciclagem nutrientes eficiente, reduzindo perdas por lixiviação e melhorando a eficiência de uso de fertilizantes.

Outra vantagem do consórcio é sua capacidade de promover resiliência funcional do sistema, contribuindo para a estabilidade da produção da soja mesmo em cenários de estresse hídrico ou de pressão fitossanitária (Ozório *et al.*, 2024; Timm *et al.*, 2024). A diversidade vegetal aumenta a diversidade microbiana no solo, estimulando organismos benéficos e suprimindo fitopatógenos, o que pode refletir positivamente na saúde da raiz da soja e em sua capacidade de absorção de nutrientes. Ao mesmo tempo, a cobertura mais uniforme e densa dificulta o estabelecimento de plantas daninhas, reduzindo a competição e a necessidade de controle químico (Timm *et al.*, 2024; Silva *et al.*, 2023).

A novidade do enfoque consorciado está, portanto, na sua multifuncionalidade: enquanto cultivos solteiros geralmente oferecem um único benefício dominante (como biomassa ou FBN). Os consórcios geram efeitos compostos que integram o manejo de solo, e promove não apenas maior produção de fitomassa, mas também melhora qualidade funcional desse material (Dalla Côt *et al.*, 2021), sendo uma estratégia eficaz para elevar a eficiência do SPD e a produtividade da cultura em sucessão. Isso transforma o sistema agrícola em uma estrutura mais complexa e equilibrada, elevando o patamar técnico do SPD.

Em resumo, o consórcio de culturas de cobertura no SPD não apenas beneficia a soja cultivada em sucessão, mas redefine a forma como manejamos o solo e os recursos naturais na segunda safra, promovendo um sistema agrícola mais eficiente, resiliente e alinhado com os princípios da intensificação ecológica. Seu uso representa uma evolução técnica no manejo da fertilidade do solo, e uma alternativa promissora para elevar a produtividade da soja de forma sustentável e duradoura.

2.2 Roçagem mecânica como estratégia de potencializar as culturas de cobertura em plantio direto

Na literatura agronômica, a produção de fitomassa pelas culturas de cobertura em SPD é amplamente analisada sob a ótica da massa seca da parte aérea (MSPA), dado seu impacto visual e função na cobertura e proteção do solo. No entanto, essa abordagem, embora válida, é incompleta. A fitomassa radicular, frequentemente negligenciada, desempenha papel igualmente ou até mais importante na sustentação da fertilidade do solo, promovendo a formação de agregados, o incremento da matéria orgânica, a ciclagem de nutrientes em profundidade e o estímulo à biologia edáfica (Santos *et al.*, 2023; Cunha *et al.*, 2010).

Nesse contexto, o sistema de Integração Lavoura-Pecuária (ILP) oferece importantes evidências. Alves *et al.*, (2021) demonstra que o pastejo animal, além de retirar parte da biomassa aérea, estimula fisiologicamente o crescimento e a renovação radicular das plantas forrageiras. Segundo o mesmo autor, após pastejo há um acúmulo significativo de raízes, principalmente nas camadas superficiais do solo, em comparação com o período anterior ao pastejo. Esse fenômeno é respaldado por estudos que mostram que o estresse moderado causado pelo desfolhamento promove a mobilização de carboidratos não estruturais (CNEs) para os tecidos basais, ativando meristemas e favorecendo a emissão de novas raízes (Carvalho *et al.*, 2001; Vilela *et al.*, 2011; Moraes *et al.*, 2014). Assim, o pastejo atua como indutor natural do enraizamento, gerando um aporte significativo de fitomassa radicular ao solo (Cunha *et al.*,

2010).

Com base na evidência consolidada da ILP, propõe-se a roçagem mecânica como uma prática inovadora para simular, em áreas de SPD, os efeitos fisiológicos promovidos pelo pastejo em plantas forrageiras. Tal prática, ao remover parcialmente a parte aérea sem eliminar a planta, rompe a dominância apical e induz um novo ciclo de crescimento, com emissão de novos perfilhos e estímulo ao desenvolvimento radicular (Cardoso *et al.*, 2024). Espécies adaptadas, como *Urochloa ruziziensis*, têm demonstrado elevado potencial de resposta a esse tipo de manejo, devido há maior emissão de raízes adventícias e aumento da densidade do sistema radicular, principalmente nas camadas superficiais do solo (Oliveira *et al.*, 2011; Sousa *et al.*, 2021; Roumet *et al.*, 2008). Rendin *et al.* (2016), demonstrou que espécies de gramíneas tem alta capacidade de produção de raízes. Segundo Sousa *et al.* (2011), por exemplo, o capim-Xaraés apresenta excelente capacidade de rebrota quando manejado em estágios ideais de interceptação de luz, demonstrando que o momento do manejo é mais decisivo que a altura de corte em si.

Além disso, Roumet *et al.* (2008) também destacaram que a produção radicular das gramíneas pode ser até 1,5 vezes superior à das leguminosas, reforçando o papel funcional dessas espécies na ciclagem de carbono e melhoria da estrutura do solo. Essa prática, portanto, favorece o fechamento do dossel, intensifica o desenvolvimento do sistema radicular.

Esses mecanismos podem ser explorados estrategicamente no SPD, sobretudo em regiões tropicais onde os solos são naturalmente pobres em matéria orgânica e sujeitos a intensa exploração agrícola (Wulanningtyas *et al.*, 2021). Nesse contexto, a diversificação funcional das culturas de cobertura em segunda safra ganha destaque, pois possibilita diferentes arquiteturas radiculares que ampliam a exploração do perfil do solo (Redin *et al.*, 2016). Assim, práticas como a roçagem mecânica, quando associadas a consórcios entre gramíneas e leguminosas, apresentam elevado potencial para intensificar os serviços ecossistêmicos (Carvalho *et al.*, 2021) prestados pelas culturas de cobertura.

A diversificação de espécies vegetais, especialmente consórcios entre gramíneas e leguminosas tem se mostrado mais eficiente que cultivos solteiros por proporcionar maior produção de biomassa, melhor cobertura do solo, maior exploração do perfil radicular e oferta equilibrada de nutrientes (Dalla Còrt *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2021; Nery e Junior, 2023).

A inovação da roçagem mecânica está justamente em sua capacidade de transformar o padrão de manejo da fitomassa, promovendo uma fragmentação parcial que tem o potencial de acelerar a decomposição dos resíduos e sincronizar a liberação de nutrientes com a fase de maior exigência da cultura subsequente. Garland *et al.* (2017) e Balbinot Junior *et al.* (2017)

destacam que esse estímulo ao crescimento contínuo das plantas ativa mecanismos biológicos que melhoram a saúde do solo, através da renovação da rizosfera e a liberação de exsudatos radiculares. Com isso, o aumento da massa radicular irá promover maior exsudação de compostos orgânicos na rizosfera, que incluem açúcares, aminoácidos, ácidos orgânicos e outros compostos bioativos (Raimam *et al.*, 2023).

Esses exsudatos atuam como fontes de energia para microrganismos do solo, estimulando a atividade da microbiota benéfica e promovendo interações simbióticas com bactérias fixadoras de nitrogênio e fungos micorrízicos (Ferreira *et al.*, 2017; Vila *et al.*, 2021). Esse processo desencadeia uma série de interações biológicas no solo, e a posterior morte e decomposição desses microrganismos liberam nutrientes essenciais, tornando-os disponíveis para as plantas (Silva *et al.*, 2023). Assim, os compostos liberados pelas raízes durante o crescimento vegetativo influenciam significativamente o conteúdo de matéria orgânica do solo e a disponibilidade de nutrientes.

A matéria orgânica do solo (MOS) é considerada um dos indicadores mais sensíveis e abrangentes da qualidade do solo, pois influencia diretamente os atributos físicos, químicos e biológicos que sustentam a produtividade agrícola e a sustentabilidade dos sistemas produtivos (Conceição *et al.*, 2005). De acordo com Silva (2023), embora represente uma pequena fração da massa total do solo, a MOS exerce papel essencial na capacidade de troca de cátions (CTC), retenção de água, tamponamento da acidez e suporte à vida microbiana. Wulanningtyas *et al.*, (2021) demonstraram que o SPD e o manejo de plantas de cobertura podem melhorar o carbono orgânico total, o N total, o P disponível, o K-Mg trocável, a densidade do solo, a resistência do solo à penetração e a respiração induzida pelo substrato, que servem como indicadores de sanidade do solo sob o cultivo da soja. Com isso, em solos tropicais, naturalmente pobres em matéria orgânica, se beneficiam enormemente do incremento contínuo de resíduos orgânicos, especialmente os derivados da biomassa radicular (Jindo *et al.*, 2020; Nardi *et al.*, 2021).

A MOS exerce papel central na regulação da disponibilidade de nutrientes, sendo diretamente responsável por boa parte da nutrição, crescimento e produtividade das culturas. Como destacado por Raji (2011), solos férteis são aqueles capazes de fornecer, de forma equilibrada, os nutrientes essenciais ao desenvolvimento das plantas, ao mesmo tempo em que restringem a absorção de elementos potencialmente tóxicos. Nesse contexto, a MOS atua como reserva de nutrientes (particularmente N, P e S), além de contribuir com a formação de complexos organo-minerais que melhoram a retenção e a disponibilização de cátions como Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^{+} (Baldock; Nelson, 2000; Raji, 2011; Fageria, 2012). Assim, práticas que elevam o acúmulo e a qualidade da MOS, tem potencial para melhorar a fertilidade do solo e otimizar

o desempenho de culturas em sucessão.

A presença de raízes induzidas pela roçagem, pode ampliar a deposição de carbono em camadas subsuperficiais, enquanto os resíduos liberados por gramíneas e leguminosas favorecem tanto o sequestro de carbono (Fageria, 2012; Carvalho *et al.*, 2021). Em estudo realizado com plantas de cobertura, Redin (2014) encontrou que, espécies como o milheto, apresentaram 53% da massa seca de raízes finas e 47% de raízes grossas e desta forma, podendo contribuir mais para o C orgânico do solo, devido a maior facilidade de penetrar e crescer no interior de agregados do solo, dificultando a decomposição. Com isso, o manejo mecânico promovido em consórcios de culturas de cobertura pode intensificar o sequestro de C via promoção do enraizamento, devido a expansão de distintos sistemas radiculares.

A rebrota das culturas de cobertura irá promover maior expansão do sistema radicular, o que também irá contribuir para a formação de bioporos e melhoria da estrutura física do solo (Balbinot Junior *et al.*, 2017). Redin *et al.* (2016) reforça que a associação de diferentes sistemas radiculares no mesmo período no solo favorece a formação de poros e bioporos com diferentes tamanhos, reduzindo a resistência do solo à penetração. Esses canais naturais resultantes da decomposição radicular aumentam a infiltração de água, a aeração contribuindo para o aumento da resiliência do solo, favorecendo a cultura em sucessão (Maia *et al.*, 2007; Haile *et al.*, 2008; De Freitas *et al.*, 2022).

Outro benefício decorrente da roçagem mecânica em sistemas consorciados é o favorecimento da fitomassa aérea residual, que pode ajudar a regular a temperatura do solo, reduzir sua amplitude térmica e criar um ambiente mais estável para o desenvolvimento da cultura seguinte (Pacheco *et al.*, 2015). Além disso, os resíduos das culturas de cobertura atuam na supressão natural de plantas daninhas, por meio de barreiras físicas e liberação de compostos alelopáticos, reduzindo a necessidade de herbicidas (Sousa *et al.*, 2021; Oliveira *et al.*, 2011; Sousa *et al.*, 2021).

Em síntese, a roçagem mecânica representa uma técnica de manejo inovadora no contexto do SPD, com elevado potencial para aumentar os benefícios da diversificação de culturas de cobertura. Ao promover a rebrota, acelerar a decomposição da biomassa, intensificar a ciclagem de nutrientes e melhorar as condições físicas e biológicas do solo, a roçagem pode contribuir de forma decisiva para o desenvolvimento saudável da soja em sucessão. Seu uso integrado a sistemas consorciados pode reforçar os princípios da intensificação ecológica e posiciona o SPD como uma base sólida para uma agricultura produtiva, eficiente e ambientalmente equilibrada.

2.3 Meta-análise na agricultura

A meta-análise é uma técnica estatística que visa combinar os resultados de múltiplos estudos independentes sobre um tema específico, proporcionando conclusões mais precisas e confiáveis. Essa abordagem é essencial para construir o conhecimento científico, pois integra as descobertas de diferentes pesquisas, permitindo identificar lacunas e áreas que precisam de mais investigação. A meta-análise é amplamente usada em diversas áreas, como medicina, psicologia e ciências sociais, onde auxilia na síntese de evidências científicas e na redução da incerteza gerada pelos estudos individuais. Essa abordagem oferece estimativas mais precisas do efeito médio de determinada intervenção e aumenta a robustez das conclusões científicas, especialmente quando há variabilidade nos dados primários (Borenstein *et al.*, 2021; Madden e Paul, 2011; Tupich, 2015).

Apesar da crescente produção científica sobre culturas de cobertura em SPD, observa-se uma lacuna importante: poucos os estudos de síntese quantitativa que utilizam a meta-análise para consolidar os resultados gerados em diferentes regiões, tipos de solo, condições climáticas e espécies vegetais. Esse vazio metodológico compromete a construção de recomendações técnicas adaptadas a diferentes realidades produtivas, sobretudo em um país de grande extensão territorial e diversidade edafoclimática como o Brasil (Garba *et al.*, 2022).

Neste contexto, a presente meta-análise justifica-se pela necessidade de reunir e analisar, de forma estatisticamente estruturada, os resultados dispersos sobre o uso de culturas de cobertura em SPD. Ao integrar dados de diferentes estudos sobre produção de fitomassa aérea, ciclagem de nutrientes (N, P, K, Ca e Mg) e produtividade da soja, esta abordagem permite identificar padrões de resposta e estimar o impacto médio dessas culturas sobre os atributos analisados (São Miguel *et al.*, 2018; Pires *et al.*, 2020; Dalla Côt *et al.*, 2021). Esta meta-análise irá contribuir diretamente para responder a perguntas ainda abertas na literatura, como: quais espécies são mais eficientes em diferentes contextos edafoclimáticos? Em que medida as culturas de cobertura impactam a produtividade da cultura principal? A análise quantitativa integrada possibilita observar padrões de resposta, medir a consistência dos efeitos e revelar, inclusive, a existência de heterogeneidade significativa entre os estudos, o que pode ser explorado como reflexo da diversidade dos agroecossistemas avaliados (Viechtbauer, 2010; Garba *et al.*, 2022)

A meta-análise é uma ferramenta estatística poderosa que permite integrar e analisar os resultados de múltiplos estudos independentes sobre um mesmo tema, proporcionando uma visão quantitativa mais robusta e confiável (Borenstein *et al.*, 2021). Dessa forma, ela reduz a

incerteza associada à escolha das espécies, orientando a seleção de plantas de cobertura mais adaptadas às condições específicas de clima e solo de cada região (Garba *et al.*, 2022). Além disso, a meta-análise irá ajudar a quantificar o impacto real das culturas de cobertura na produtividade da soja, oferecendo dados objetivos, como o incremento de produtividade em comparação ao pousio ou ao uso de espécies menos eficientes.

Outro ponto importante é que a meta-análise avalia a consistência dos efeitos observados, revelando a variabilidade dos resultados entre os estudos (Tupich, 2015). Isso permite identificar quais espécies mais influenciam o sucesso do sistema. Como consequência, gestores agrícolas, técnicos e produtores rurais podem basear suas decisões em evidências científicas consolidadas, escolhendo práticas de manejo mais eficientes e reduzindo os riscos agronômicos e econômicos.

3 CAPÍTULO I: Culturas de cobertura sobre a ciclagem de nutrientes, fitomassa aérea e produtividade da soja em sistema plantio direto: uma meta-análise

RESUMO

Em um cenário agrícola que exige produtividade com sustentabilidade, as culturas de cobertura se consolidam como ferramentas-chave para transformar o solo em um ativo estratégico no sistema plantio direto. Esta meta-análise teve como objetivo avaliar os efeitos do uso de culturas de cobertura em sistema plantio direto (SPD) sobre a produção de fitomassa aérea, a ciclagem de nutrientes (N, P, K, Ca e Mg) e a produtividade da soja em sucessão. Foram analisados dados extraídos de 10 estudos científicos conduzidos no Brasil entre 2010 e 2025, abrangendo os biomas Cerrado e Cerrado nordestino, com ampla variação em condições edafoclimáticas, espécies utilizadas e sistemas de manejo. A análise foi realizada com base na diferença de médias padronizada (SMD), utilizando modelos de efeitos aleatórios para considerar a heterogeneidade entre os estudos. As culturas de cobertura foram agrupadas por subgrupos funcionais (gramíneas, leguminosas e consórcios), permitindo uma avaliação mais detalhada do desempenho de cada tipo. Mesmo diante de alta heterogeneidade ($I^2 > 75\%$ em várias variáveis), foi possível identificar espécies com desempenho positivo consistente, como *Urochloa ruziziensis*, *Pennisetum glaucum* e *Crotalaria spectabilis*. Os resultados demonstraram que as culturas de cobertura promovem benefícios significativos na ciclagem de nutrientes e na melhoria das condições do solo, com reflexos diretos na sustentabilidade do sistema e na produtividade da soja.

Palavras-chave: *Pennisetum glaucum*, *Crotalaria spectabilis*, agricultura sustentável.

ABSTRACT

In an agricultural scenario that demands productivity with sustainability, cover crops are consolidating as key tools to transform the soil into a strategic asset in the no-till system. This meta-analysis aimed to evaluate the effects of using cover crops in the no-till system (NT) on the production of aboveground phytomass, nutrient cycling (N, P, K, Ca, and Mg), and soybean productivity in succession. Data extracted from 10 scientific studies conducted in Brazil between 2010 and 2025 were analyzed, covering the biomes of Cerrado and northeastern Cerrado, with a wide variation in edaphoclimatic conditions, species used, and management systems. The analysis was conducted based on the standardized mean difference (SMD), using random effects models to account for heterogeneity among the studies. Cover crops were grouped by functional subgroups (grasses, legumes, and consortiums), allowing for a more detailed evaluation of the performance of each type. Even in the face of high heterogeneity ($I^2 > 75\%$ in several variables), it was possible to identify species with consistently positive performance, such as *Urochloa ruziziensis*, *Pennisetum glaucum*, and *Crotalaria spectabilis*. The results demonstrated that cover crops promote significant benefits in nutrient cycling and in improving soil conditions, with direct impacts on system sustainability and soybean productivity.

Keywords: *Pennisetum glaucum*, *Crotalaria spectabilis*, sustainable agriculture.

4 INTRODUÇÃO

O sistema plantio direto é amplamente reconhecido como uma das principais práticas conservacionistas voltadas à promoção da sustentabilidade agrícola, sobretudo em regiões tropicais. Sua adoção, fundamentada na ausência do revolvimento do solo, na manutenção contínua da cobertura vegetal e na rotação de culturas, proporciona melhorias significativas nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (Pacheco *et al.*, 2011). A eficiência do SPD, no entanto, depende da implementação adequada de culturas de cobertura, que atuam como agentes fundamentais na proteção do solo, no aumento da matéria orgânica e na promoção da ciclagem de nutrientes essenciais para o crescimento das plantas (Pacheco *et al.*, 2018; Silva *et al.*, 2023).

Embora os benefícios das culturas de cobertura estejam bem documentados, sua eficiência na produção de fitomassa pode alcançar valores superiores a 6.000 kg ha⁻¹ de massa seca, contribuindo de forma significativa para o acúmulo de matéria orgânica no solo e a ciclagem de nutrientes (São Miguel *et al.*, 2018; Davi *et al.*, 2023), ainda há variabilidade significativa nos resultados observados. A eficiência dessas culturas pode variar de acordo com o manejo adotado, as espécies selecionadas e as condições edafoclimáticas específicas (Torres *et al.*, 2021; Pires *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2023). Essa variabilidade gera incertezas quanto à magnitude dos efeitos positivos das culturas de cobertura na sucessão da soja, principal cultura econômica do país, especialmente em termos de incremento de produtividade.

A soja, ao ser cultivada em sucessão a culturas de cobertura, pode se beneficiar de melhorias substanciais quanto ao solo, como maior disponibilidade de nutrientes, aumento da atividade biológica e melhores condições hídricas, refletindo-se em aumentos expressivos de produtividade. Tais condições refletem-se em aumentos de produtividade da soja, com registros de ganhos médios entre 10% e 25%, dependendo da espécie de cobertura utilizada (Pacheco *et al.*, 2017; São Miguel *et al.*, 2018). Contudo, a heterogeneidade dos resultados torna necessária uma abordagem científica que sintetize, de forma quantitativa e robusta, o conhecimento gerado em diferentes estudos (Garba *et al.*, 2022).

Diante da diversidade de práticas, espécies e condições edafoclimáticas existentes, a meta-análise surge como uma ferramenta poderosa para sintetizar os resultados de múltiplos estudos e gerar evidências quantitativas robustas (Paulo; Barari, 2022) sobre os benefícios das culturas de cobertura em SPD. Essa abordagem irá permitir identificar padrões e lacunas no conhecimento, avaliar a consistência dos efeitos sobre a fertilidade do solo e a produtividade da soja, e fornecer subsídios técnicos e científicos e os manejos mais eficientes e sustentáveis

quanto ao uso das culturas de cobertura (Garba *et al.*, 2022).

Assim, objetivou-se por meio desta meta-análise estimar os efeitos do uso de culturas de cobertura em sistema plantio direto sobre o acúmulo de fitomassa aérea, a ciclagem de nutrientes (N, P, K, Ca, Mg) e a produtividade da soja em sucessão.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Busca sistemática

A busca sistemática da literatura foi conduzida com o objetivo de identificar estudos realizados no Brasil entre os anos de 2010 e 2025 que abordassem os efeitos de culturas de cobertura e da palhada sobre a ciclagem de nutrientes e a produtividade da soja em sistema plantio direto. A seleção dos manuscritos científicos seguiu as diretrizes do protocolo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), para garantir a transparência, reprodutibilidade e rigor metodológico na seleção e análise dos estudos (Marcondes e Da Silva, 2023). O processo foi dividido em quatro etapas principais: (1ª etapa) identificação; (2ª etapa) triagem; (3ª etapa) elegibilidade; e (4ª etapa) inclusão, baseado na metodologia apresentada por Lima *et al.* (2024).

A pesquisa foi realizada nas bases de dados científicas Web of Science e Scopus, selecionadas por sua abrangência multidisciplinar e relevância para a área das ciências agrárias. Foram utilizadas as seguintes combinações de palavras-chave, aplicadas com operadores booleanos (“AND”, “OR”) no campo de busca por título, resumo ou palavras-chave (tabela 1). Esta pesquisa resultou um somatório de 2.552 documentos publicados nas bases de dados utilizadas.

Tabela 1: Termos aplicados no campo de busca nas bases de dados por título, resumo ou palavras-chaves.

Etapa	Palavras-Chaves
Identificação (1ª)	("Phytomass" AND "nutrient cycling")
	OR
	("Straw" AND "nutrient cycling")
	OR
	("Cover crops" AND "nutrient cycling")
	OR
	("Nutrient cycling" AND "soybean")
	OR
	("Cover crops" AND "straw")
	OR
("Cover crops" AND "soybean productivity")	
OR	
("Cover crops" AND "macronutrients")	

O período considerado para a busca foi de janeiro de 2010 a março de 2025, abrangendo os últimos 15 anos de produção científica sobre o tema. Foram incluídos apenas artigos de acesso aberto, com texto completo disponível gratuitamente, a fim de garantir a transparência dos dados e a possibilidade de extração de informações completas. Além disso, os estudos elegíveis deveriam obrigatoriamente ter sido conduzidos no Brasil, considerando suas condições edafoclimáticas específicas e a predominância do sistema plantio direto no contexto nacional. A segunda etapa consistiu na aplicação dos seguintes critérios de exclusão: artigos não disponíveis em acesso aberto; trabalhos de revisão, relatos técnicos, dissertações, teses e resumos de congressos; estudos conduzidos fora do território brasileiro. Após a aplicação destes critérios de exclusão nos mecanismos de buscas dentro das bases de dados, por meio dos filtros, a amostra foi reduzida para 329 artigos publicados.

Após a aplicação dos critérios de exclusão descritos na etapa anterior, os artigos potencialmente elegíveis foram organizados em um banco de dados. Em seguida, realizou-se o processo de remoção de duplicatas utilizando o software RStudio, por meio da função “`duplicated()`” aplicada aos identificadores de título e DOI dos estudos (Battisti e Da Silva, 2019; Harrer *et al.*, 2021). Essa etapa foi essencial para garantir que cada artigo incluído fosse único e não redundante entre as diferentes bases consultadas. Como resultado desse refinamento, obteve-se um total de 261 artigos distintos.

Posteriormente, iniciou-se a terceira etapa, onde realizou-se a leitura dos títulos e resumos de todos os artigos remanescentes, com o objetivo de verificar sua aderência ao escopo da pesquisa e excluir aqueles que: não abordavam culturas de cobertura, palhada, ciclagem de nutrientes (N, P, K, Ca e Mg) ou produtividade da soja; e tratavam de sistemas de manejo não compatíveis com a pesquisa. Essa triagem adicional permitiu refinar o conjunto de estudos selecionados, reduzindo-o para 29 artigos, os quais seguiram para leitura completa e extração detalhada dos dados.

Durante a leitura integral, foram excluídos 19 artigos adicionais, por não apresentarem dados completos, ou por não atenderem aos critérios de extração quantitativa definidos nesta pesquisa. Assim, 10 artigos foram incluídos na meta-análise final, sendo submetidos à extração padronizada das variáveis de interesse (Tabela 2).

Tabela 2: Matriz dos estudos, locais e variáveis que forneceram os dados para as meta-análises.

Estudos (Ano)	Local	N	P	K	Ca	Mg	Fitomassa Aérea	Produtividade da Soja
Assis <i>et al.</i> (2016)	Rio Verde, GO	x					x	
Dalla Côrt <i>et al.</i> (2021)	Rondonópolis, MT	x	x	x	x	x	x	
Davi <i>et al.</i> (2023)	Rondonópolis, MT	x	x	x	x	x	x	x
Morais <i>et al.</i> (2020)	Alvorada do Gurguéia, PI	x	x	x	x	x		
Pacheco <i>et al.</i> (2017)	Rondonópolis, MT						x	x
São Miguel <i>et al.</i> (2018)	Rio Verde, GO	x	x	x	x	x	x	x
Pacheco <i>et al.</i> (2013a)	Bom Jesus, PI	x	x	x	x	x	x	x
Araujo <i>et al.</i> (2024)	Santo Antônio de Goiás, GO	x	x	x	x	x		x
Pires <i>et al.</i> (2020)	Bom Jesus, PI	x	x	x	x	x	x	x
Pacheco <i>et al.</i> (2013b)	Santo Antônio de Goiás, GO	x	x	x	x	x	x	x
Total de Estudos	10	9	8	8	8	8	8	7

5.2 Análise estatística da meta-análise

A análise estatística foi conduzida por meio de uma meta-análise quantitativa, com o objetivo de integrar e comparar os efeitos de diferentes culturas de cobertura, em sistema plantio direto, sobre o acúmulo de nutrientes (N, P, K, Ca e Mg), a produção de fitomassa aérea e a produtividade da soja em sucessão. Para isso, foram utilizados estudos primários que apresentavam delineamentos experimentais com comparações diretas entre tratamentos com culturas de cobertura (grupo experimental) e tratamento controle (sem cobertura), e que disponibilizavam medidas de tendência central (média), número de repetições (n) e, em sua maioria, o coeficiente de variação (CV) (Koricheva *et al.*, 2013; Borenstein *et al.*, 2021; Deeks *et al.*, 2023).

Como parte dos estudos incluídos não apresentava diretamente o valor do desvio padrão (DP), este foi calculado com base no CV informado, utilizando a seguinte fórmula:

$$DP = \frac{CV(\%)}{100} \times Média$$

Posteriormente, o erro padrão (SE) de cada grupo foi obtido por:

$$SE = \frac{DP}{\sqrt{n}}$$

Com os valores de média, SE e n para cada grupo, foi possível calcular o efeito do tratamento (TE), definido como o logaritmo da razão entre as médias do grupo com cobertura e do grupo controle:

$$TE = \log\left(\frac{Média_{Cobertura}}{Média_{Controle}}\right)$$

E o erro padrão combinado do efeito foi calculado por:

$$SE_{TE} = \sqrt{\left(\frac{SE_{Cobertura}}{Média_{Cobertura}}\right)^2 + \left(\frac{SE_{Controle}}{Média_{Controle}}\right)^2}$$

As análises foram realizadas utilizando o modelo de efeitos aleatórios, com estimativa da variância entre estudos (τ^2) pelo método de máxima verossimilhança restrita (REML). Essa abordagem considera a existência de heterogeneidade verdadeira entre os estudos (Higgins *et al.*, 2003, Schwarzer *et al.*, 2015).

Os resultados foram apresentados por meio de gráficos do tipo *Forest plot*, mostrando os efeitos individuais de cada estudo e o efeito médio combinado, com respectivos intervalos de confiança (IC 95%). Foi realizada uma análise por subgrupos, considerando a classificação funcional das culturas de cobertura (gramíneas, leguminosas ou consórcios), para cada variável escolhida. A heterogeneidade entre os estudos foi quantificada pelos coeficientes I^2 e τ^2 (Higgins *et al.*, 2003). Todas as análises foram conduzidas no software RStudio, utilizando os pacotes meta, readxl e dplyr (Viechtbauer, 2010; Schwarzer *et al.*, 2015; Battisti e Da Silva, 2019).

A heterogeneidade entre os estudos foi avaliada inicialmente pelo teste de hipótese nula associado ao valor de p , que indica a probabilidade de se observar algum grau de heterogeneidade ao acaso. Valores baixos de p sugerem maior probabilidade de heterogeneidade real entre os estudos. A medida estatística I^2 foi utilizada para quantificar essa

heterogeneidade, representando a proporção da variância observada que é atribuída a diferenças reais no tamanho do efeito entre os estudos, e não ao erro amostral (Higgins *et al.*, 2003). O valor de I^2 varia de 0 a 100%, sendo considerado: não importante (0–40%), moderado (30–60%), substancial (50–90%) ou considerável (75–100%) (Higgins e Thompson, 2002; Dike *et al.*, 2021). Valores negativos de I^2 são assumidos como zero.

A variância real entre os efeitos foi estimada por meio do parâmetro τ^2 , conforme o método proposto por DerSimonian e Laird (1986). Esse parâmetro reflete a dispersão dos tamanhos de efeito verdadeiros entre os estudos e é utilizado para atribuir pesos aos estudos no modelo de efeitos aleatórios. Quando $\tau^2 = 0$, os modelos de efeitos fixos e aleatórios fornecem estimativas equivalentes.

Para fins interpretativos, o tamanho do efeito médio combinado foi classificado com base na proposta de Cohen (2013), sendo considerado: efeito muito pequeno ou nulo ($0 \leq \text{SMD} \leq 0,2$), efeito pequeno ($0,2 < \text{SMD} \leq 0,5$), efeito moderado ($0,5 < \text{SMD} \leq 0,8$) e efeito grande ($\text{SMD} > 0,8$). Essa categorização foi empregada na descrição dos resultados para facilitar a compreensão da magnitude dos efeitos observados.

6 Resultados

O uso de culturas de cobertura em sistema plantio direto exerce influência positiva sobre o acúmulo de nutrientes na fitomassa aérea, produção de fitomassa aérea e produtividade da soja, embora os efeitos variem de acordo com o tipo funcional das espécies utilizadas. De forma geral, os três subgrupos analisados (gramíneas, leguminosas e consórcios) apresentaram efeito positivo, porém com graus distintos de significância estatística e heterogeneidade.

6.1 Nitrogênio

As gramíneas se destacaram por apresentar o efeito grande positivo (SMD = 1,20; IC 95% = [0,60; 1,81]), indicando contribuição significativa para o acúmulo de nitrogênio em comparação ao tratamento controle (Figura 1). Esse efeito foi estatisticamente significativo e acompanhado por heterogeneidade considerável entre os estudos ($I^2 = 99,6\%$). Tal variabilidade pode ser atribuída à diversidade de espécies, manejos e ambientes experimentais incluídos na análise. Alguns estudos apresentaram efeitos muito altos, como o de Assis *et al.* (2016), que avaliou *Pennisetum glaucum* ADR300, ADR500, ADR7010 e *Sorghum bicolor*, com SMDs superiores a 3. Por outro lado, efeitos negativos ou próximos de zero foram observados, como em Pacheco *et al.* (2013b) com *Urochloa ruziziensis* (SMD = -0,39) e Dalla Côt *et al.* (2021) com pousio em sistema plantio direto (SMD = -0,0953), contribuindo para a elevada heterogeneidade observada. Ainda assim, o efeito médio permanece positivo e estatisticamente significativo.

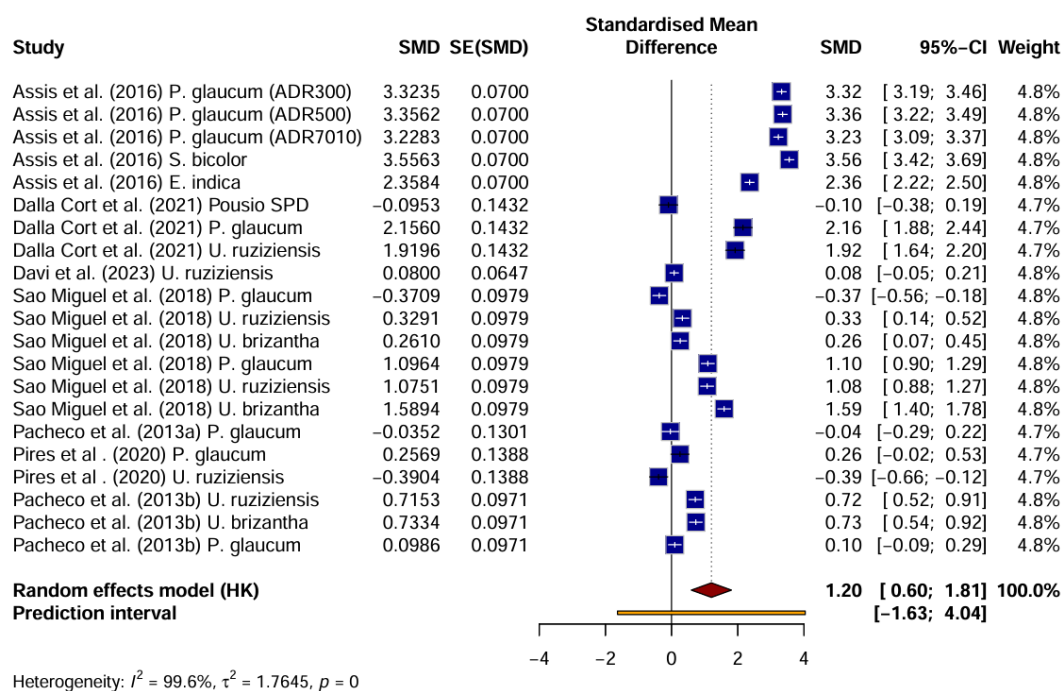


Figura 1: *Forest plot* da meta-análise sobre o efeito das culturas de cobertura na variável nitrogênio, considerando o subgrupo gramíneas, em comparação ao tratamento controle. A medida de efeito utilizada foi a SMD (Standardized Mean Difference), que representa a diferença de médias padronizada entre os grupos. Os valores de SE (SMD) correspondem ao erro padrão associado a cada estimativa individual. O modelo estatístico adotado foi de efeitos aleatórios, com intervalo de confiança de 95% para cada estudo e para o efeito combinado.

As leguminosas apresentaram um efeito pequeno (SMD = 0,48; IC 95% = [-0,06; 1,03]), sem alcançar significância estatística (Figura 2). A heterogeneidade foi considerável ($I^2 = 98,1\%$), refletindo alta variabilidade nos resultados entre os estudos. Foram observados efeitos positivos expressivos, como os obtidos por Dalla Còrt *et al.* (2021) com *Crotalaria spectabilis* (SMD = 2,30) e *Vigna unguiculata* (SMD = 1,41), além de *Cajanus cajan* em São Miguel *et al.* (2018) (SMD = 1,35). No entanto, efeitos negativos ou baixos também foram registrados: *C. breviflora* (SMD = -0,71), *C. spectabilis* (SMD = -0,19) e *C. capitata* (SMD = -0,32), o que evidencia que o desempenho das leguminosas depende fortemente da espécie utilizada e possivelmente das condições edafoclimáticas..

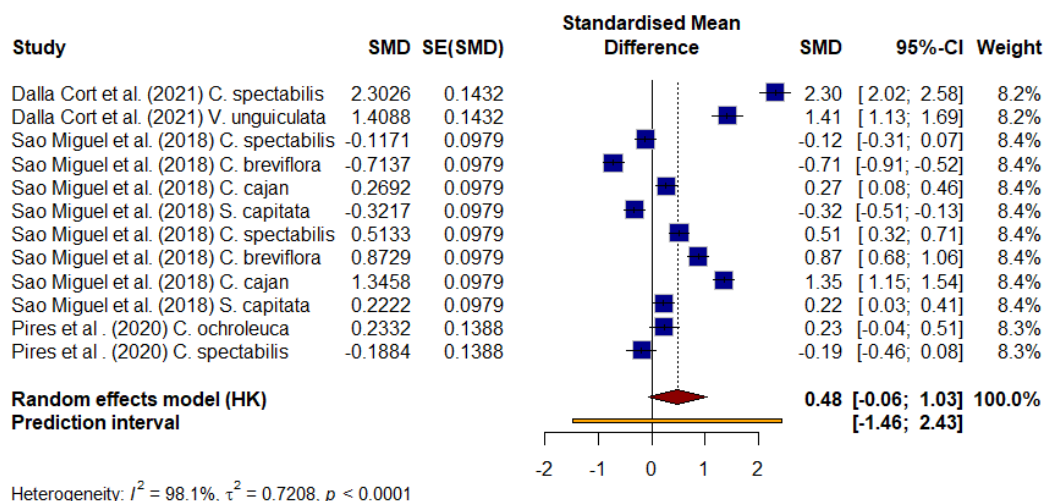


Figura 2: Forest plot da meta-análise sobre o efeito das culturas de cobertura na variável nitrogênio, considerando o subgrupo leguminosas, em comparação ao tratamento controle. A medida de efeito utilizada foi a SMD (Standardized Mean Difference), que representa a diferença de médias padronizada entre os grupos. Os valores de SE (SMD) correspondem ao erro padrão associado a cada estimativa individual. O modelo estatístico adotado foi de efeitos aleatórios, com intervalo de confiança de 95% para cada estudo e para o efeito combinado.

Os consórcios de culturas apresentaram efeito moderado e estatisticamente significativo (SMD = 0,67; IC 95% = [0,23; 1,11]), indicando que a combinação entre gramíneas e leguminosas pode potencializar o acúmulo de nitrogênio (Figura 3). A heterogeneidade foi também considerável ($I^2 = 98,5\%$), embora a maioria dos estudos tenha apresentado efeitos positivos consistentes. Destaque para os consórcios avaliados por Dalla Còrt *et al.* (2021), como milho + *C. spectabilis* (SMD = 2,77), *Helianthus annuus* + *U. ruziziensis* (SMD = 2,82) e milho + *U. ruziziensis* (SMD = 2,39). Embora alguns estudos tenham apresentado efeitos negativos ou próximos de zero, a maioria concentrou-se em valores positivos entre 0,2 e 0,6, reforçando a conclusão de que os consórcios contribuem para o acúmulo de nitrogênio.

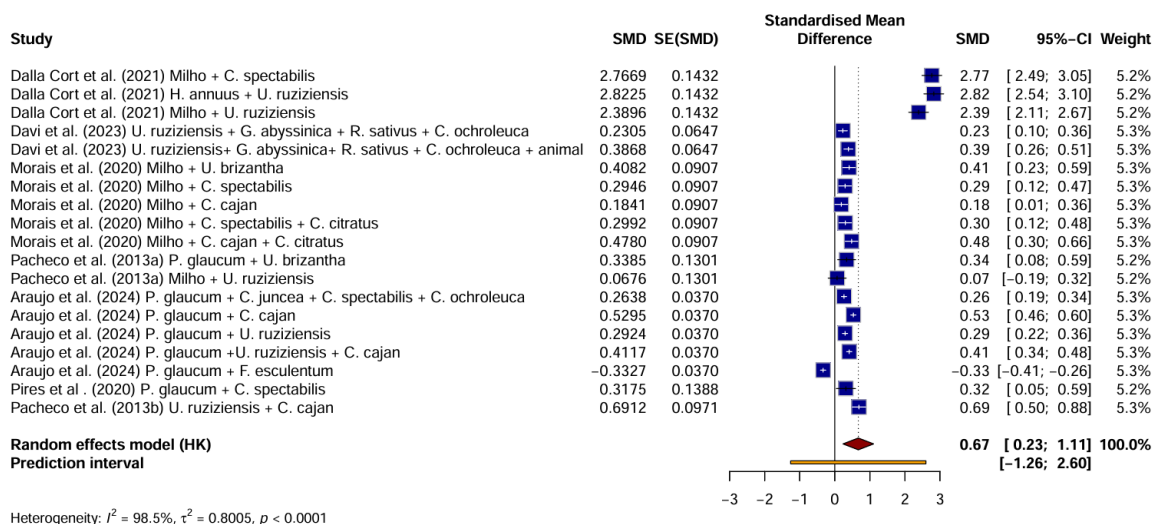


Figura 3: Forest plot da meta-análise sobre o efeito das culturas de cobertura na variável nitrogênio, considerando o subgrupo consórcios, em comparação ao tratamento controle. A medida de efeito utilizada foi a SMD (Standardized Mean Difference), que representa a diferença de médias padronizada entre os grupos. Os valores de SE (SMD) correspondem ao erro padrão associado a cada estimativa individual. O modelo estatístico adotado foi de efeitos aleatórios, com intervalo de confiança de 95% para cada estudo e para o efeito combinado.

6.2 Fósforo

As gramíneas apresentaram o efeito moderado e estatisticamente significativo, com SMD = 0,70 (IC 95% = [0,27; 1,13]), indicando um efeito positivo no acúmulo de fósforo na fitomassa aérea em comparação ao controle (Figura 4). No entanto, a análise revelou heterogeneidade considerável entre os estudos ($I^2 = 99,0\%$). Foram observados efeito grande, como em *Pennisetum glaucum* (SMD = 2,25) e *Urochloa ruziziensis* (SMD = 1,50) avaliadas por Dalla Côt et al. (2021), além de múltiplos efeitos positivos relatados por São Miguel et al. (2018), com SMDs entre 0,89 e 1,70. Outros estudos apresentaram efeitos neutros ou muito pequeno, como o pousio em SPD (SMD = -0,69), *U. brizantha* (SMD = -0,32) e *P. glaucum* em diferentes contextos (SMD = -0,04), reforçando a ampla variação entre os resultados. Ainda assim, a maioria dos estudos apresenta efeitos positivos entre moderados a grandes, sustentando a conclusão do efeito médio positivo das gramíneas.

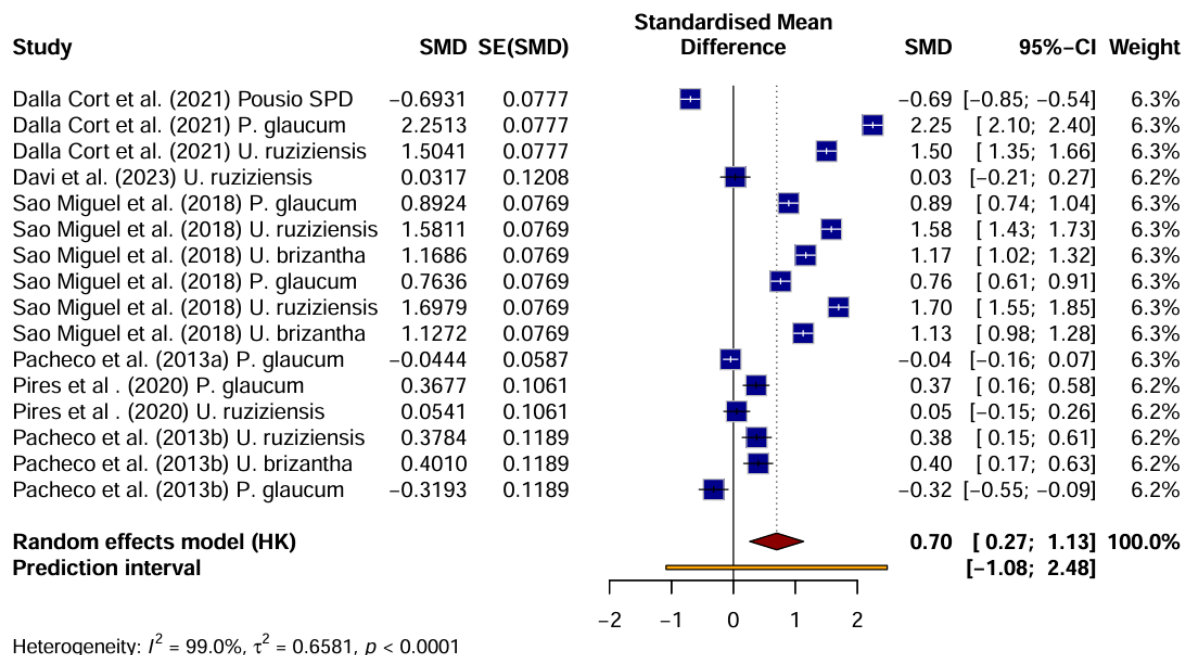
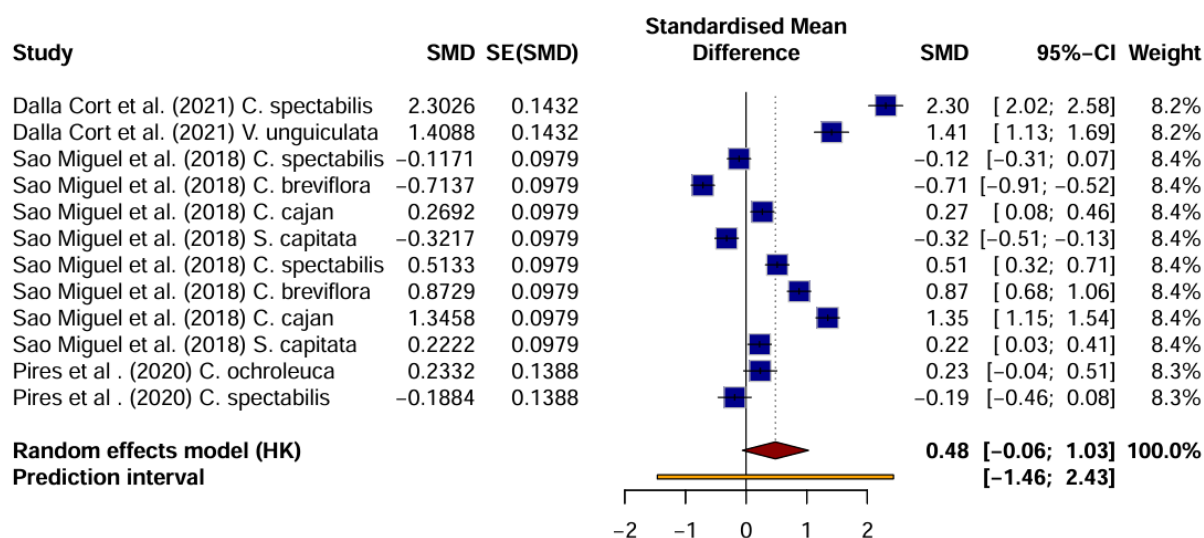


Figura 4: *Forest plot* da meta-análise sobre o efeito das culturas de cobertura na variável fósforo, considerando o subgrupo gramíneas, em comparação ao tratamento controle. A medida de efeito utilizada foi a SMD (Standardized Mean Difference), que representa a diferença de médias padronizada entre os grupos. Os valores de SE (SMD) correspondem ao erro padrão associado a cada estimativa individual. O modelo estatístico adotado foi de efeitos aleatórios, com intervalo de confiança de 95% para cada estudo e para o efeito combinado.

As leguminosas apresentaram um efeito pequeno (SMD = 0,48; IC 95% = [-0,06; 1,03]), e estatisticamente não significativo, conforme mostra a Figura 5. A heterogeneidade entre os estudos foi considerável ($I^2 = 98,1\%$), evidenciando forte variação nos efeitos estimados. Foram identificados efeitos grandes, como em *Crotalaria spectabilis* (SMD = 2,30), *Vigna unguiculata* (SMD = 1,41) e *Cajanus cajan* (SMD = 1,35), relatados por Dalla Còrt *et al.* (2021) e São Miguel *et al.* (2018). Entretanto, também foram registrados efeitos neutros, como *C. breviflora* (SMD = -0,71 e -0,32) e *C. spectabilis* (SMD = -0,19).



Heterogeneity: $I^2 = 98.1\%$, $\tau^2 = 0.7208$, $p < 0.0001$

Figura 5: *Forest plot* da meta-análise sobre o efeito das culturas de cobertura na variável fósforo, considerando o subgrupo leguminosas, em comparação ao tratamento controle. A medida de efeito utilizada foi a SMD (Standardized Mean Difference), que representa a diferença de médias padronizada entre os grupos. Os valores de SE (SMD) correspondem ao erro padrão associado a cada estimativa individual. O modelo estatístico adotado foi de efeitos aleatórios, com intervalo de confiança de 95% para cada estudo e para o efeito combinado.

Os consórcios de culturas de cobertura apresentaram um efeito médio pequeno e não significativo (SMD = 0,30; IC 95% = [-0,21; 0,82]) para a variável fósforo (Figura 6). A heterogeneidade foi a mais alta entre os subgrupos, classificada como considerável ($I^2 = 99,4\%$), indicando ampla dispersão dos efeitos observados. Alguns consórcios apresentaram efeitos positivos grandes, como milho + *C. spectabilis* (SMD = 2,35), *Helianthus annuus* + *U. ruziziensis* (SMD = 2,97) e milho + *U. ruziziensis* (SMD = 1,95), todos em Dalla Còrt *et al.* (2021). Por outro lado, foram observados efeitos neutros ou negativos em combinações como milho + *C. cajan* (SMD = -0,77), milho + *C. spectabilis* + *Cymbopogon citratus* (SMD = -0,62), e *P. glaucum* + *U. ruziziensis* + *C. cajan* (SMD = 0,25), além de *P. glaucum* + *U. brizantha* (SMD = -0,21). Esses resultados indicam que, embora alguns consórcios apresentem benefícios potenciais, o efeito médio do grupo é limitado, com alta variabilidade entre os estudos.

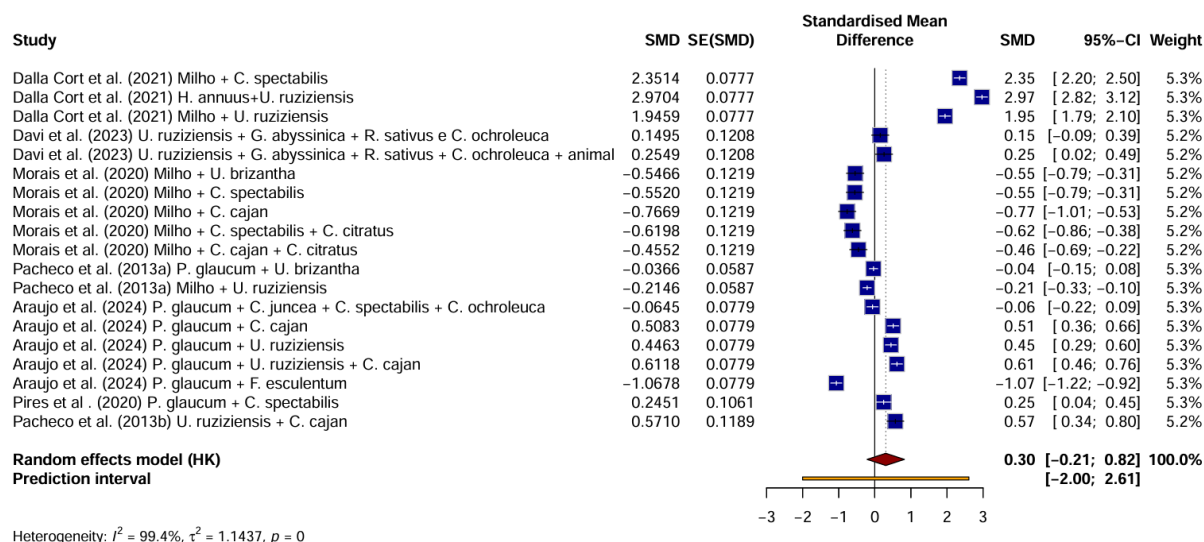


Figura 6: Forest plot da meta-análise sobre o efeito das culturas de cobertura na variável fósforo, considerando o subgrupo consórcios, em comparação ao tratamento controle. A medida de efeito utilizada foi a SMD (Standardized Mean Difference), que representa a diferença de médias padronizada entre os grupos. Os valores de SE (SMD) correspondem ao erro padrão associado a cada estimativa individual. O modelo estatístico adotado foi de efeitos aleatórios, com intervalo de confiança de 95% para cada estudo e para o efeito combinado.

6.3 Potássio

As gramíneas apresentaram um efeito médio moderado, porém não significativo (SMD = 0,51; IC 95% = [-0,03; 1,05]) no acúmulo de potássio na fitomassa (Figura 7). Apesar da tendência de aumento do potássio na fitomassa, os resultados foram inconsistentes entre os estudos. Estudos com maiores efeitos positivos: Dalla Côt *et al.* (2021) *P. glaucum*: SMD = 2,40, Dalla Côt *et al.* (2021) *U. ruziziensis*: SMD = 2,14, São Miguel *et al.* (2018) *U. ruziziensis*: SMD = 1,54 e Pacheco *et al.* (2013b) *U. brizantha*: SMD = 1,06. Efeitos negativos ou próximos de zero: Pires *et al.* (2020) *U. ruziziensis*: SMD = -1,56, Pires *et al.* (2020) *P. glaucum*: SMD = -0,62, Pacheco *et al.* (2013a) *P. glaucum*: SMD = -0,17 e Davi *et al.* (2023) *U. ruziziensis*: SMD = -0,38.

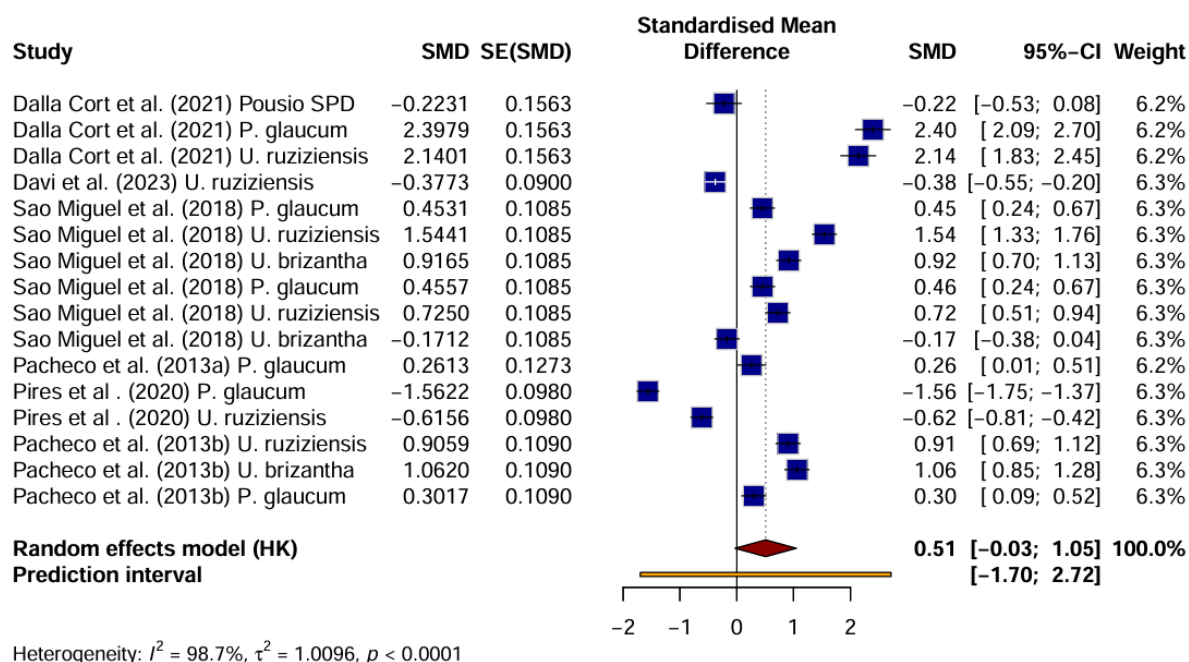


Figura 7: Forest plot da meta-análise sobre o efeito das culturas de cobertura na variável potássio, considerando o subgrupo gramíneas, em comparação ao tratamento controle. A medida de efeito utilizada foi a SMD (Standardized Mean Difference), que representa a diferença de médias padronizada entre os grupos. Os valores de SE (SMD) correspondem ao erro padrão associado a cada estimativa individual. O modelo estatístico adotado foi de efeitos aleatórios, com intervalo de confiança de 95% para cada estudo e para o efeito combinado.

As leguminosas apresentaram o menor efeito médio entre os subgrupos (SMD = 0,36; IC 95% = [-0,13; 0,86]), caracterizado como pequeno e não significativo (Figura 8). A heterogeneidade foi considerável ($I^2 = 97,6\%$), evidenciando grande variação entre as espécies. Efeitos positivos relevantes: Dalla Còrt *et al.* (2021) *C. spectabilis*: SMD = 1,87, Dalla Còrt *et al.* (2021) *V. unguiculata*: SMD = 1,10, São Miguel *et al.* (2018) *C. cajan*: SMD = 1,20 e São Miguel *et al.* (2018) *C. spectabilis*: SMD = 0,98. Efeitos neutros ou negativos: São Miguel *et al.* (2018) *C. breviflora*: SMD = -0,91 Pires *et al.* (2020) *C. ochroleuca*: SMD = -0,14 e Pires *et al.* (2020) *C. spectabilis*: SMD = -0,41. A alta heterogeneidade ($I^2 = 97,6\%$) reforça que a eficiência das leguminosas na ciclagem de K é variável e depende da espécie.

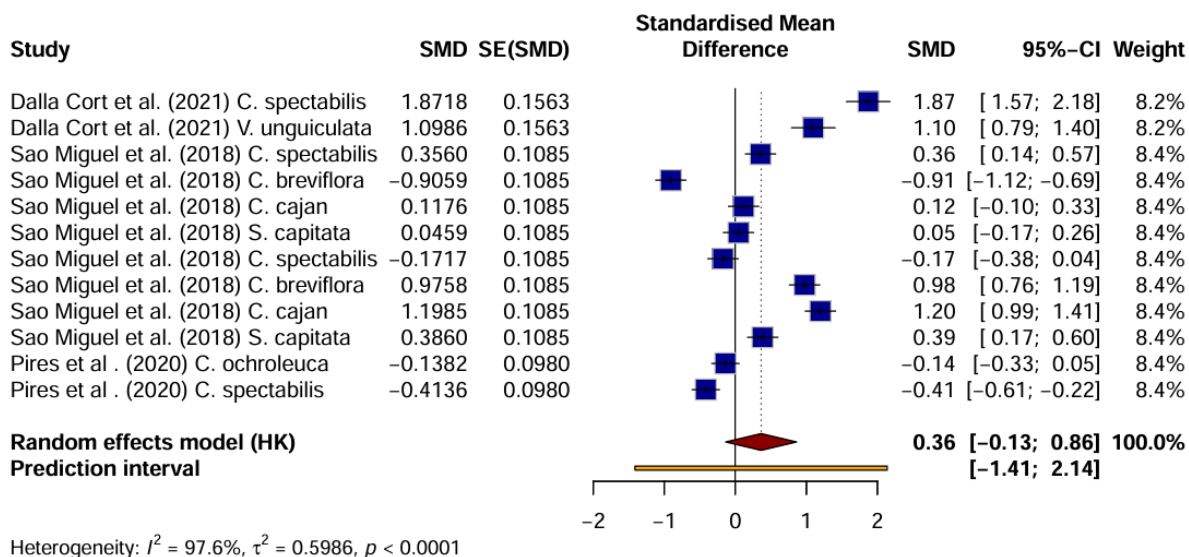


Figura 8: *Forest plot* da meta-análise sobre o efeito das culturas de cobertura na variável potássio, considerando o subgrupo leguminosas, em comparação ao tratamento controle. A medida de efeito utilizada foi a SMD (Standardized Mean Difference), que representa a diferença de médias padronizada entre os grupos. Os valores de SE (SMD) correspondem ao erro padrão associado a cada estimativa individual. O modelo estatístico adotado foi de efeitos aleatórios, com intervalo de confiança de 95% para cada estudo e para o efeito combinado.

Os consórcios apresentaram o maior efeito médio para potássio (SMD = 0,80; IC 95% = [0,26; 1,35]), caracterizado como entre moderado e grande, e estatisticamente significativo (Figura 9). Esse resultado indica que, em média, os consórcios de espécies contribuíram de forma eficaz para o acúmulo de K no fitomassa em comparação ao controle. Efeitos grandes: Dalla Côt et al. (2021) com Milho + *C. spectabilis*: SMD = 2,60, *H. annuus* + *U. ruziziensis*: SMD = 3,09 e Milho + *U. ruziziensis*: SMD = 2,67. Efeitos nulos: Araujo et al. (2024) *P. glaucum* + *F. Esculentum*: SMD = -1,79, Morais et al. (2020) Milho + *C. cajan*: SMD = -0,30 e Pacheco et al. (2013b) *U. ruziziensis* + *C. cajan*: SMD = 0,83. No entanto, a análise apresentou heterogeneidade extremamente alta ($I^2 = 98,4\%$), refletindo a diversidade de arranjos de consórcios, espécies utilizadas.

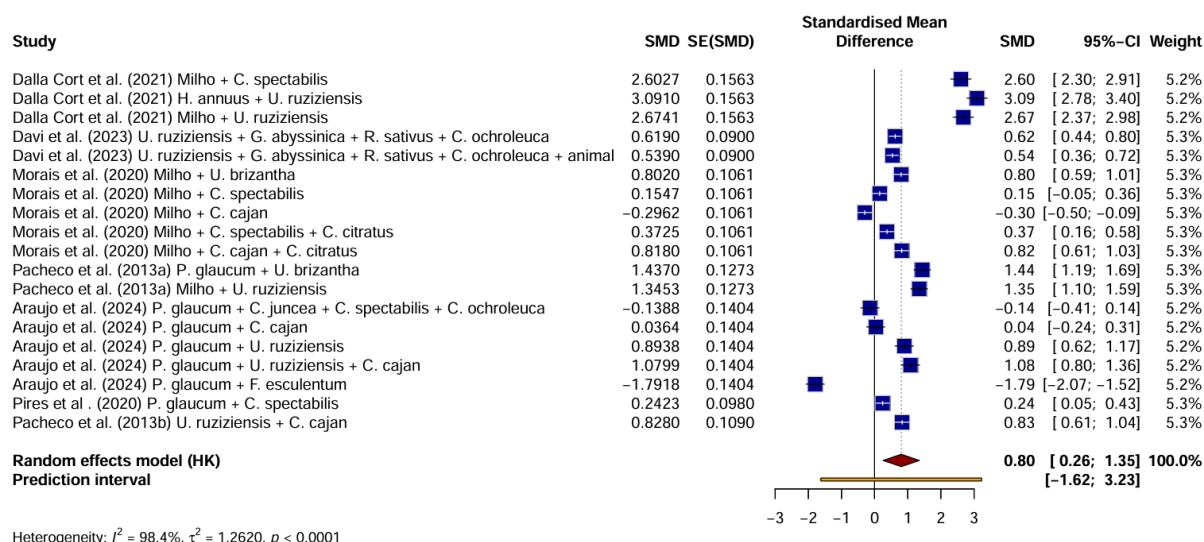


Figura 9: – *Forest plot* da meta-análise sobre o efeito das culturas de cobertura na variável potássio, considerando o subgrupo consórcios, em comparação ao tratamento controle. A medida de efeito utilizada foi a SMD (Standardized Mean Difference), que representa a diferença de médias padronizada entre os grupos. Os valores de SE (SMD) correspondem ao erro padrão associado a cada estimativa individual. O modelo estatístico adotado foi de efeitos aleatórios, com intervalo de confiança de 95% para cada estudo e para o efeito combinado.

6.4 Cálcio

As gramíneas apresentaram o maior efeito médio padronizado para o acúmulo de cálcio (SMD = 0,88; IC 95% = [0,46; 1,31]), sendo grande e estatisticamente significativo (Figura 10). Isso indica que, em média, as gramíneas promoveram aumento relevante no acúmulo de cálcio em comparação ao tratamento controle. Efeitos altamente positivos: Dalla Còrt *et al.* (2021) *P. glaucum*: SMD = 2,61, São Miguel *et al.* (2018) com *U. ruziziensis*: SMD = 1,51, *U. brizantha*: SMD = 1,18 e *P. glaucum*: SMD = 1,65 e 1,87, Pacheco *et al.* (2013b) com *U. Brizantha*: SMD = 0,34 e *U. ruziziensis*: SMD = 0,7. Efeitos negativos ou neutros: Pires *et al.* (2020) *U. ruziziensis*: SMD = -0,12 e Pacheco *et al.* (2013a) *P. glaucum*: SMD = -0,12. A grande maioria dos estudos mostrou efeitos positivos, embora alguns efeitos negativos estejam presentes, reforçando a heterogeneidade. A heterogeneidade foi alta ($I^2 = 98,3$).

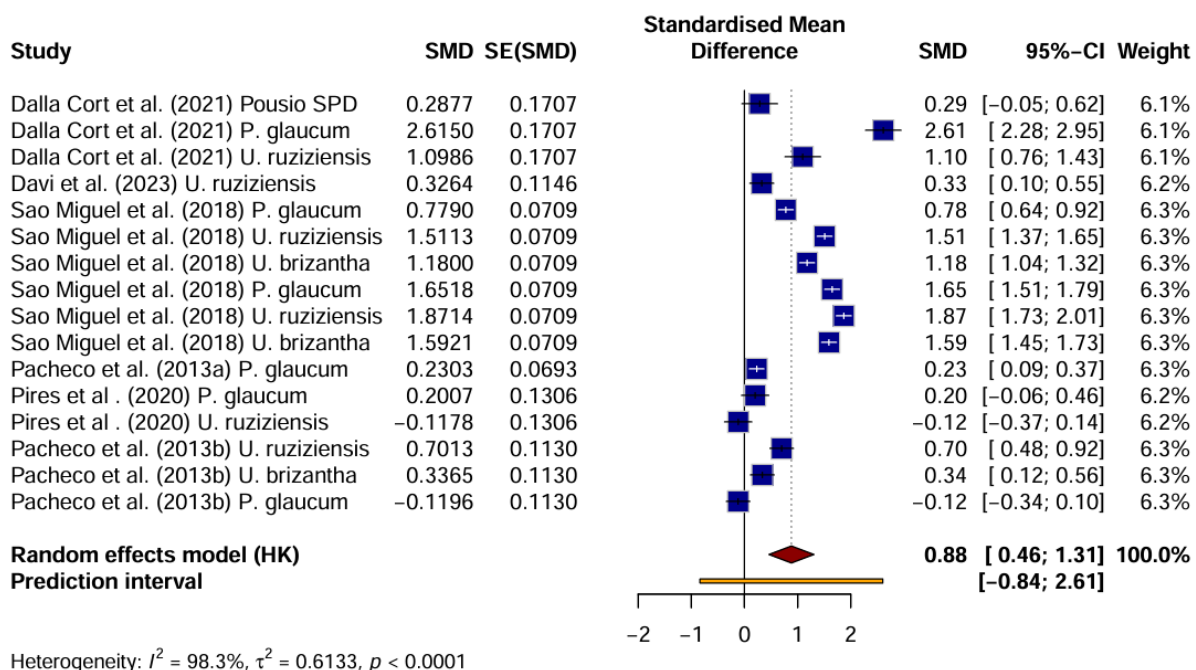


Figura 10: Forest plot da meta-análise sobre o efeito das culturas de cobertura na variável cálcio, considerando o subgrupo gramíneas, em comparação ao tratamento controle. A medida de efeito utilizada foi a SMD (Standardized Mean Difference), que representa a diferença de médias padronizada entre os grupos. Os valores de SE (SMD) correspondem ao erro padrão associado a cada estimativa individual. O modelo estatístico adotado foi de efeitos aleatórios, com intervalo de confiança de 95% para cada estudo e para o efeito combinado.

As leguminosas também apresentaram efeito moderado a grande e significativo (SMD = 0,78; IC 95% = [0,32; 1,23]) no acúmulo de cálcio (Figura 11). Efeitos grandes: Dalla Côt *et al.* (2021) com *C. spectabilis*: SMD = 1,99 e *V. unguiculata*: SMD = 1,67, São Miguel *et al.* (2018) com *C. cajan*: SMD = 1,34 e *S. capitata*: SMD = 0,96, Pires *et al.* (2020) *C. spectabilis*: SMD = 0,46. Efeitos nulos: Pires *et al.* (2020) *C. ochroleuca*: SMD = -0,40, São Miguel *et al.* (2018) com *C. breviflora*: SMD = 0,57 e 1,29 e *S. capitata*: SMD = 0,13. A heterogeneidade entre os estudos também foi elevada ($I^2 = 98,1\%$).

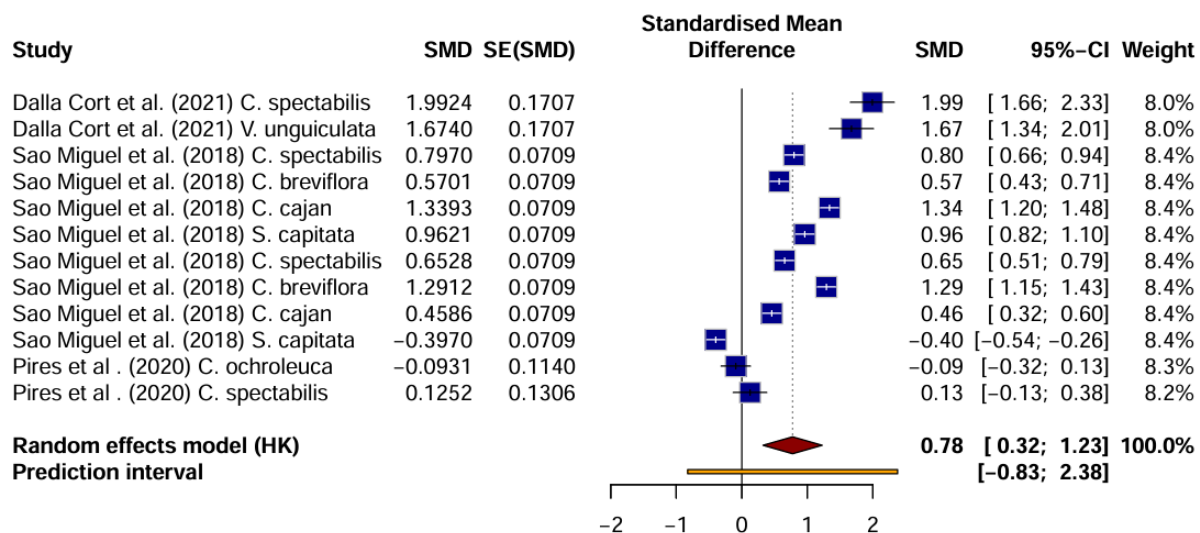


Figura 11: *Forest plot* da meta-análise sobre o efeito das culturas de cobertura na variável cálcio, considerando o subgrupo leguminosas, em comparação ao tratamento controle. A medida de efeito utilizada foi a SMD (Standardized Mean Difference), que representa a diferença de médias padronizada entre os grupos. Os valores de SE (SMD) correspondem ao erro padrão associado a cada estimativa individual. O modelo estatístico adotado foi de efeitos aleatórios, com intervalo de confiança de 95% para cada estudo e para o efeito combinado.

Os consórcios de culturas de cobertura apresentaram efeito médio grande e significativo (SMD = 0,83; IC 95% = [0,35; 1,31]) (Figura 13). Efeitos grandes: Dalla Côt *et al.* (2021) com Milho + *C. spectabilis*: SMD = 2,54, *H. annuus* + *U. ruziziensis*: SMD = 3,27 e Milho + *U. ruziziensis*: SMD = 2,83, Araujo *et al.* (2024): com consórcios entre *P. glaucum* e *C. cajan*, *U. ruziziensis*, *F. Esculentum* e *C. spectabilis*: SMD entre 0,60 e 1,15. Efeitos nulos: Morais *et al.* (2020): Milho + *C. cajan*: SMD = -0,30, Milho + *C. spectabilis* + *C. citratus*: SMD = 0,37 e Pacheco *et al.* (2013a): *P. glaucum* + *U. brizantha*: SMD = -0,06. Ainda assim, a heterogeneidade ($I^2 = 98,3\%$).

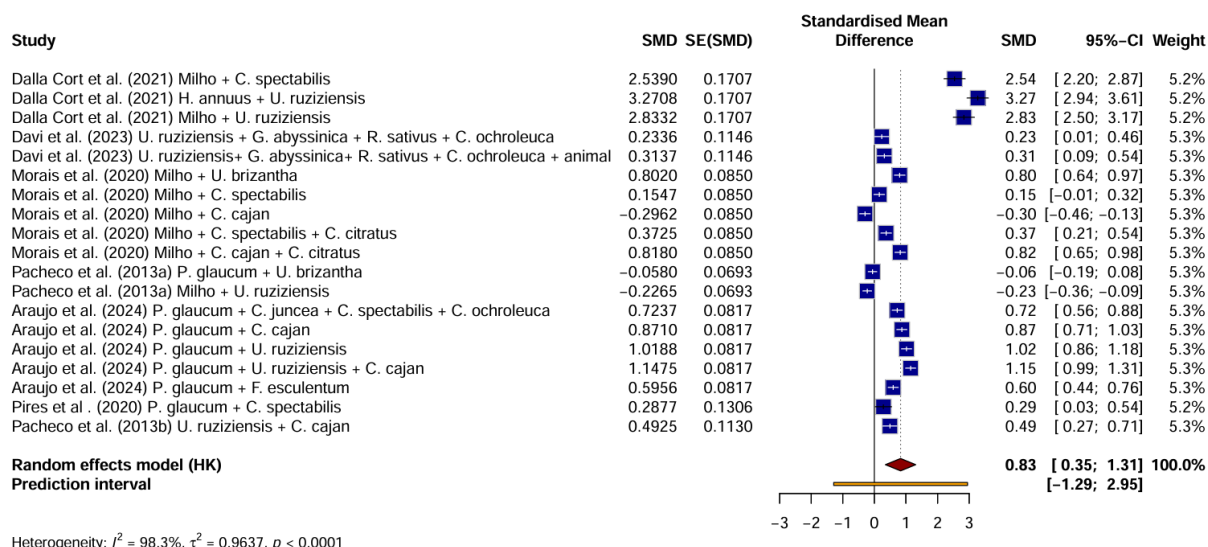


Figura 12: *Forest plot* da meta-análise sobre o efeito das culturas de cobertura na variável cálcio, considerando o subgrupo consórcios, em comparação ao tratamento controle. A medida de efeito utilizada foi a SMD (Standardized Mean Difference), que representa a diferença de médias padronizada entre os grupos. Os valores de SE (SMD) correspondem ao erro padrão associado a cada estimativa individual. O modelo estatístico adotado foi de efeitos aleatórios, com intervalo de confiança de 95% para cada estudo e para o efeito combinado.

6.5 Magnésio

As gramíneas apresentaram o maior efeito médio padronizado no acúmulo de magnésio (SMD = 0,72; IC 95% = [0,28; 1,16]), caracterizado como moderado a grande e estatisticamente significativo (Figura 13). A maioria dos estudos indicou efeitos positivos consistentes, especialmente com *U. ruziziensis* (SMDs entre 1,59 e 2,15) e *U. brizantha* (SMD = 1,37). Por outro lado, *P. glaucum* mostrou maior variabilidade, com efeitos próximos de zero ou negativos, como SMD = -0,40. A comparação com o pousio em SPD (SMD = -0,90) reforça os benefícios das gramíneas. A heterogeneidade foi considerável ($I^2 = 97,4\%$), refletindo variações entre espécies, ambientes e estratégias de manejo.

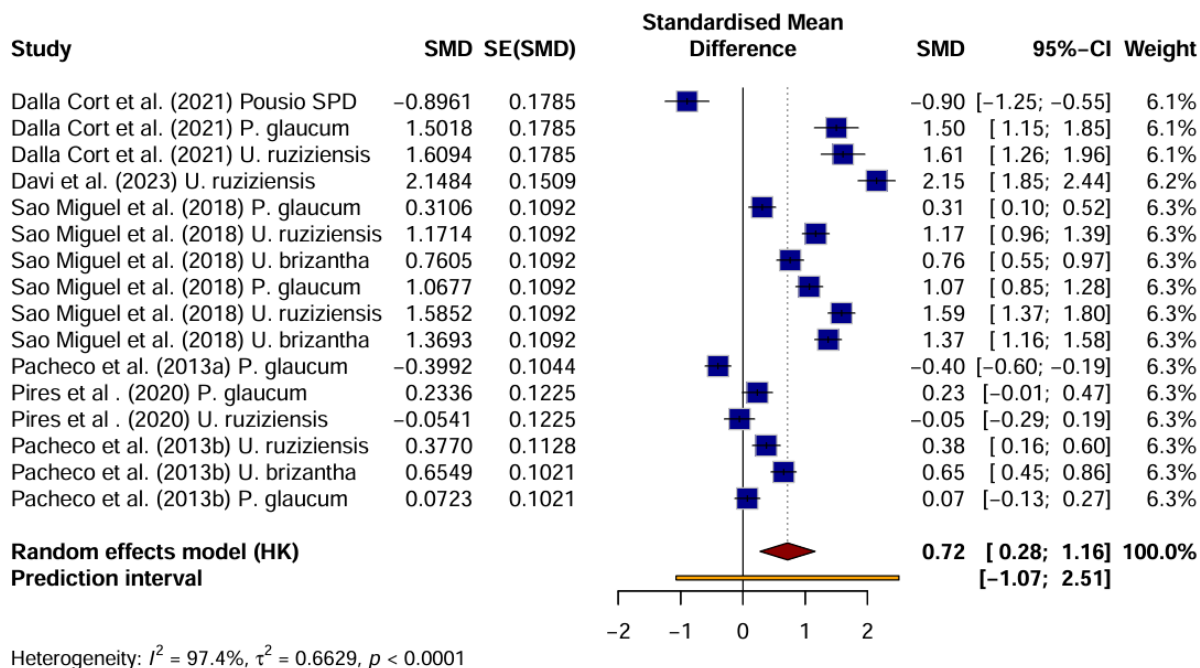


Figura 13: Forest plot da meta-análise sobre o efeito das culturas de cobertura na variável magnésio, considerando o subgrupo gramíneas, em comparação ao tratamento controle. A medida de efeito utilizada foi a SMD (Standardized Mean Difference), que representa a diferença de médias padronizada entre os grupos. Os valores de SE (SMD) correspondem ao erro padrão associado a cada estimativa individual. O modelo estatístico adotado foi de efeitos aleatórios, com intervalo de confiança de 95% para cada estudo e para o efeito combinado.

As leguminosas também promoveram efeito médio positivo pequeno e significativo (positivo) (SMD = 0,39; IC 95% = [0,02; 0,76]), com heterogeneidade elevada ($I^2 = 96\%$). Efeitos grandes: Dalla Côt *et al.* (2021) *C. spectabilis*: SMD = 1,05, São Miguel *et al.* (2018) com *C. spectabilis*: SMD = 0,70 - 0,29, *C. cajan*: SMD = 1,01 e *C. breviflora*: SMD = 0,25 e 1,00, Pires *et al.* (2020) *C. spectabilis*: SMD = 1,14. Efeitos nulos: São Miguel *et al.* (2018) *S. capitata*: SMD = 0,02 e 0,28 (quase nulo), Pires *et al.* (2020) *C. ochroleuca*: SMD = -0,46 e Dalla Côt *et al.* (2021) *V. unguiculata*: SMD = -0,04. A maioria das espécies apresentou efeito positivo, mas com algumas exceções que puxam o valor médio para baixo. A alta heterogeneidade ($I^2 = 96\%$) observada entre os estudos.

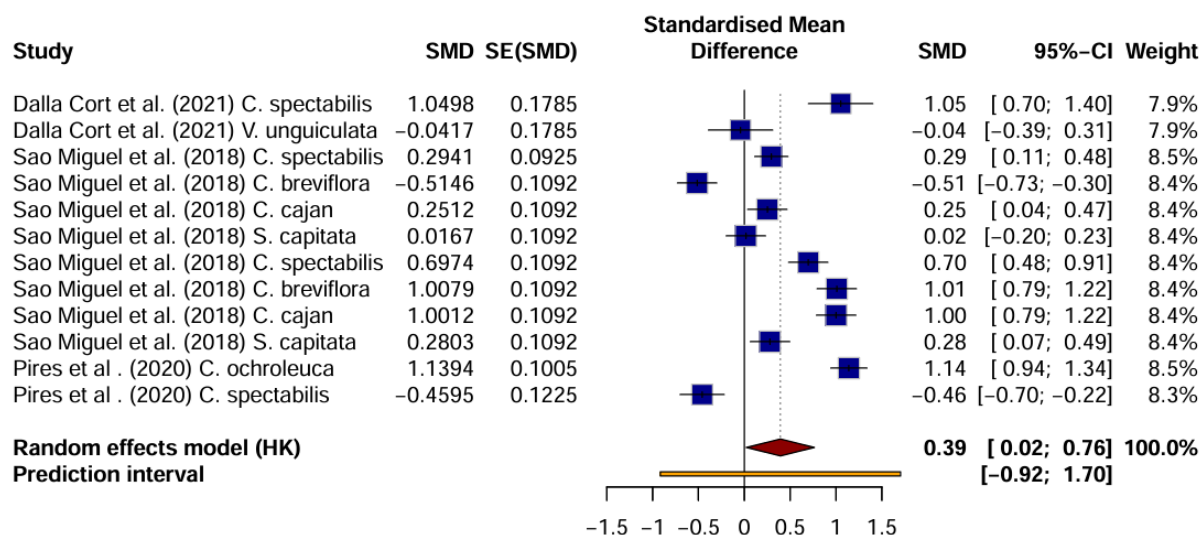


Figura 14: Forest plot da meta-análise sobre o efeito das culturas de cobertura na variável magnésio, considerando o subgrupo leguminosas, em comparação ao tratamento controle. A medida de efeito utilizada foi a SMD (Standardized Mean Difference), que representa a diferença de médias padronizada entre os grupos. Os valores de SE (SMD) correspondem ao erro padrão associado a cada estimativa individual. O modelo estatístico adotado foi de efeitos aleatórios, com intervalo de confiança de 95% para cada estudo e para o efeito combinado.

Os consórcios apresentaram efeito pequeno e não significativo (SMD = 0,31; IC 95% = [-0,15; 0,77]), com heterogeneidade considerável ($I^2 = 98,6\%$), indicando alta variabilidade entre os arranjos. Efeitos grandes: Dalla Còrt *et al.* (2021) com Milho + *C. spectabilis*: SMD = 1,74, *H. annuus* + *U. ruziziensis*: SMD = 2,21 e Milho + *U. ruziziensis*: SMD = 1,84. Efeitos negativos marcantes: Morais *et al.* (2020) com Milho + *U. brizantha*: SMD = -1,78, Milho + *C. spectabilis*: SMD = -0,67 e Milho + *C. cajan*: SMD = -0,75 Milho + *C. spectabilis* + *C. citratus*: SMD = -0,31. Efeitos moderados e positivos: Araujo *et al.* (2024) com múltiplos consórcios: SMDs entre 0,25 e 0,87, Pires *et al.* (2020) *P. glaucum* + *C. spectabilis*: SMD = 0,63 e Pacheco *et al.* (2013b) *U. ruziziensis* + *C. cajan*: SMD = 0,39. A heterogeneidade elevada ($I^2 = 98,6\%$).

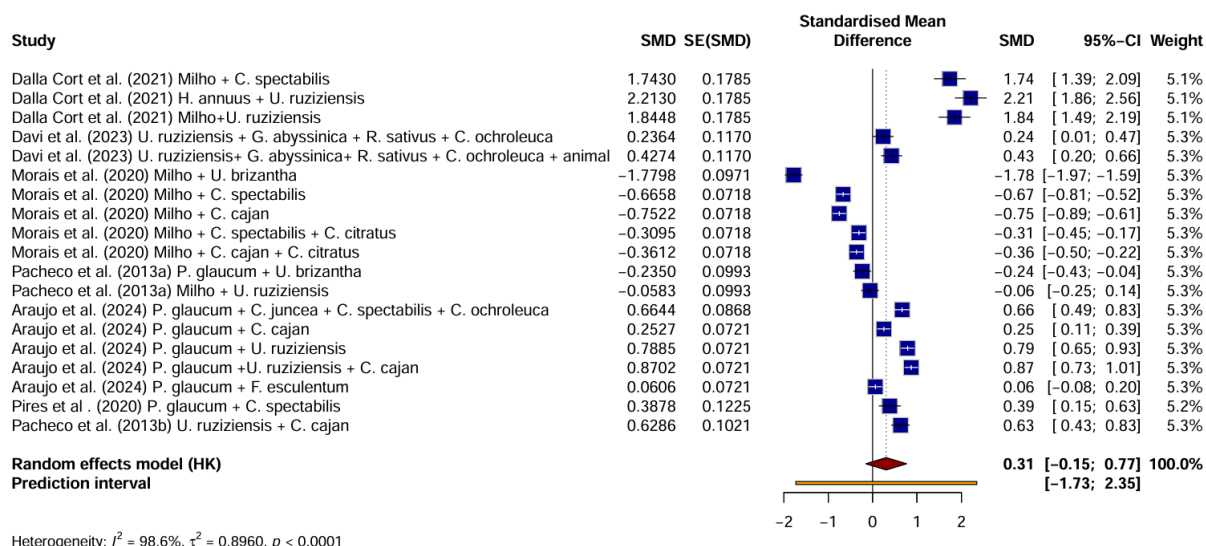


Figura 15: *Forest plot* da meta-análise sobre o efeito das culturas de cobertura na variável magnésio, considerando o subgrupo consórcios, em comparação ao tratamento controle. A medida de efeito utilizada foi a SMD (Standardized Mean Difference), que representa a diferença de médias padronizada entre os grupos. Os valores de SE (SMD) correspondem ao erro padrão associado a cada estimativa individual. O modelo estatístico adotado foi de efeitos aleatórios, com intervalo de confiança de 95% para cada estudo e para o efeito combinado.

6.6 Fitomassa aérea

As gramíneas apresentaram um efeito médio padronizado grande e estatisticamente significativo (SMD = 1,04), indicando forte incremento na produção de fitomassa aérea em comparação ao controle (Figura 16). Efeitos positivos grandes: Dalla Côt *et al.* (2021) com *P. glaucum*: SMD = 2,89 e *U. ruziziensis*: SMD = 3,01, São Miguel *et al.* (2018) com *U. ruziziensis*: SMD = 1,91 e *P. glaucum*: SMD = 1,68 – 1,30, Assis *et al.* (2016) *P. glaucum*, *S. bicolor*: SMDs entre 1,19 e 1,35. Efeitos nulos: Dalla Côt *et al.* (2021) Pousio em plantio direto SMD = -2,66. Foi observado alta heterogeneidade ($I^2 = 98,6\%$).

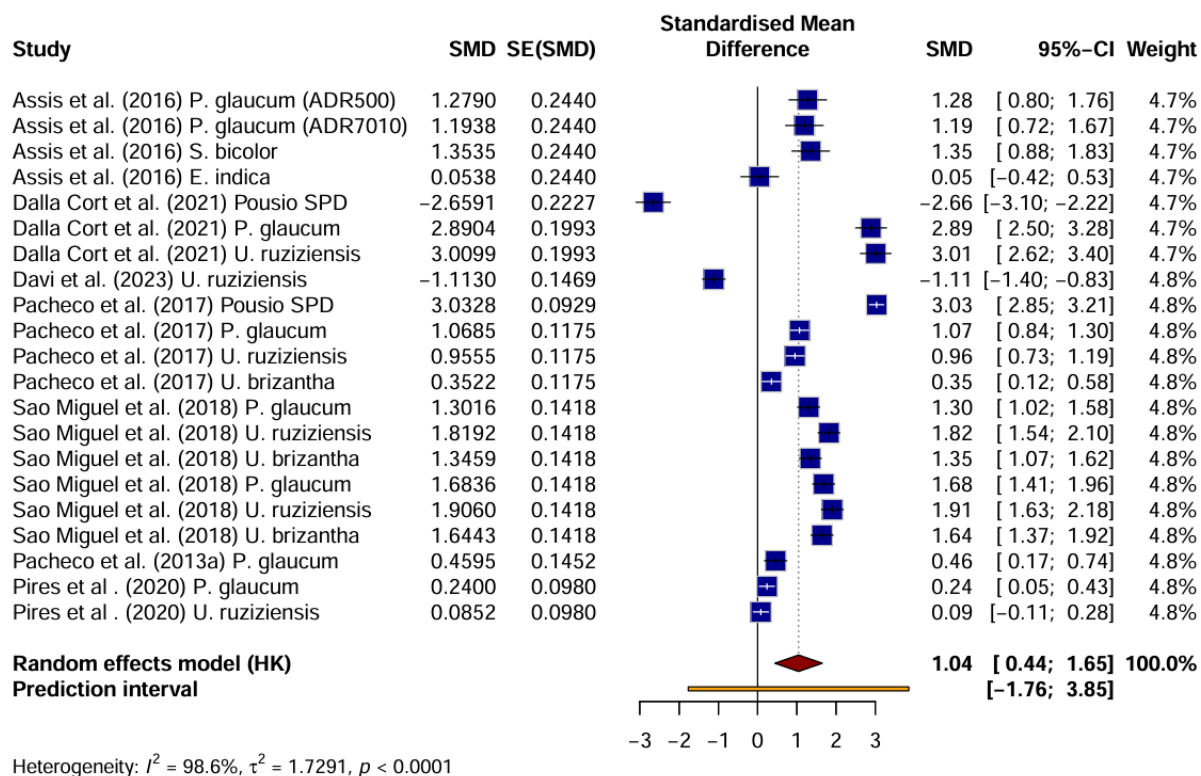


Figura 16: *Forest plot* da meta-análise sobre o efeito das culturas de cobertura na variável fitomassa aérea, considerando o subgrupo gramíneas, em comparação ao tratamento controle. A medida de efeito utilizada foi a SMD (Standardized Mean Difference), que representa a diferença de médias padronizada entre os grupos. Os valores de SE (SMD) correspondem ao erro padrão associado a cada estimativa individual. O modelo estatístico adotado foi de efeitos aleatórios, com intervalo de confiança de 95% para cada estudo e para o efeito combinado.

As leguminosas apresentaram efeito médio moderado, com intervalo de confiança limítrofe para significância estatística (SMD = 0,63; IC 95% = [-0,00; 1,26]) (Figura 17). Efeitos grandes positivos: Dalla Còrt *et al.* (2021) com *C. spectabilis*: SMD = 2,64 e *V. unguiculata*: SMD = 1,64, São Miguel *et al.* (2018) com *C. cajan*: SMD = 1,45, *C. breviflora*: SMD = 1,31 e *C. spectabilis*: SMD = 1,27, Pires *et al.* (2020) *C. spectabilis*: SMD = 1,27. Efeitos nulos: São Miguel *et al.* (2018) com *C. breviflora*: SMD = -1,68 e *S. capitata*: SMD = -1,42, Pires *et al.* (2020) *C. ochroleuca*: SMD = -0,36. Essa variação contribuiu para a alta heterogeneidade ($I^2 = 98,3\%$), indicando que o potencial de acúmulo de fitomassa aérea entre as leguminosas depende fortemente da espécie e do ambiente.

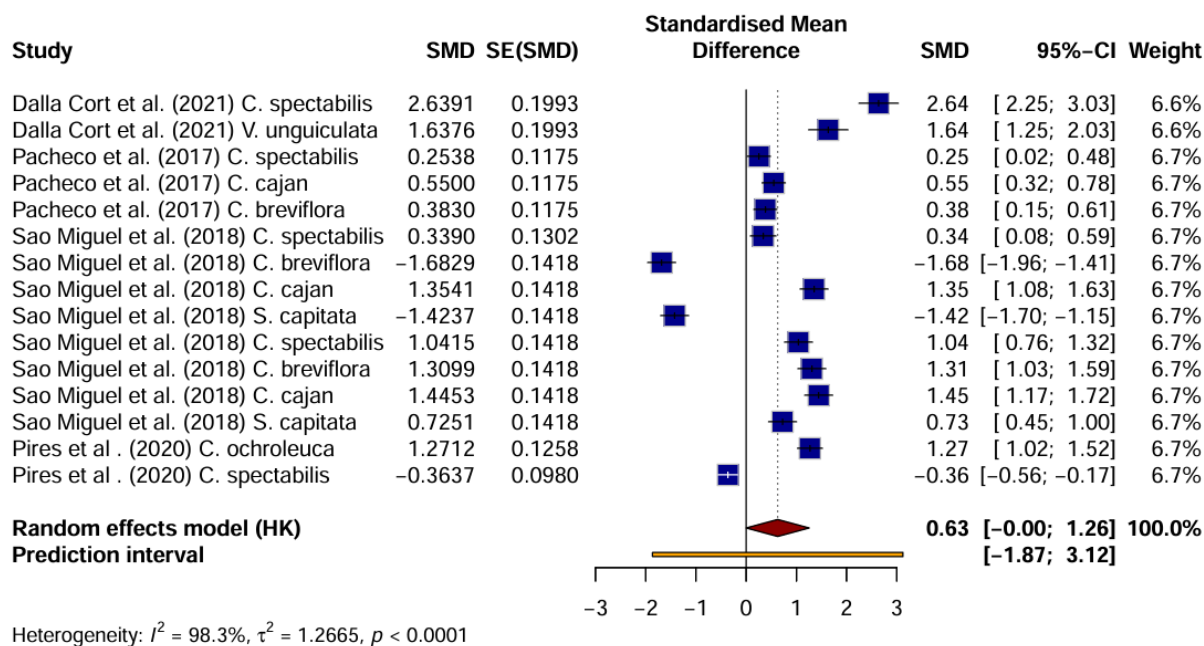


Figura 17: Forest plot da meta-análise sobre o efeito das culturas de cobertura na variável fitomassa aérea, considerando o subgrupo leguminosas, em comparação ao tratamento controle. A medida de efeito utilizada foi a SMD (Standardized Mean Difference), que representa a diferença de médias padronizada entre os grupos. Os valores de SE (SMD) correspondem ao erro padrão associado a cada estimativa individual. O modelo estatístico adotado foi de efeitos aleatório, com intervalo de confiança de 95% para cada estudo e para o efeito combinado.

Os consórcios apresentaram o maior efeito médio entre todos os subgrupos (SMD = 1,12), caracterizado como grande e estatisticamente significativo (Figura 18). Efeitos grandes positivos: Dalla Cört *et al.* (2021) com Milho + *C. spectabilis*: SMD = 3,22, *H. annuus* + *U. ruziziensis*: SMD = 3,45 e Milho + *U. ruziziensis*: SMD = 3,18. Efeitos nulos: Davi *et al.* (2023) com consórcios com e sem pastejo: SMD = 0,04 e 0,33, Pacheco *et al.* (2013a) com *P. glaucum* + *U. brizantha*: SMD = 0,06 e Milho + *U. ruziziensis*: SMD = -0,23e Pacheco *et al.* (2017) *S. capitata* + *S. macrocephala*: SMD = -0,16. A heterogeneidade extremamente elevada ($I^2 = 98,9\%$).

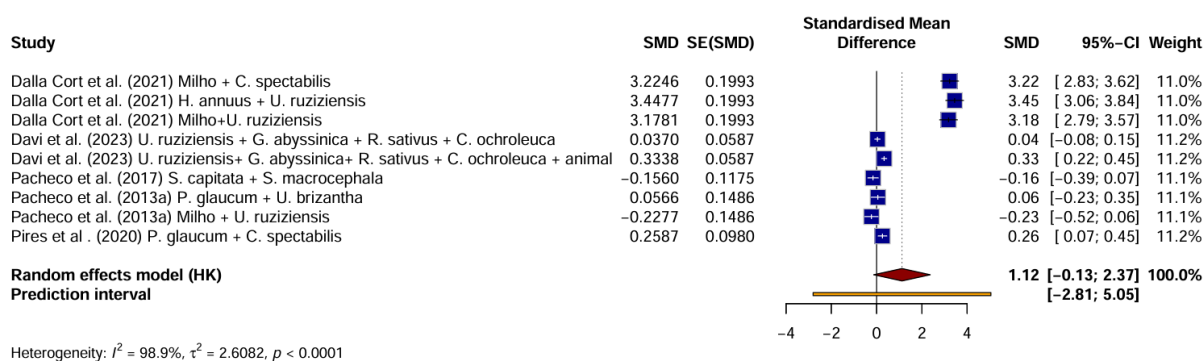


Figura 18: Forest plot da meta-análise sobre o efeito das culturas de cobertura na variável

fitomassa aérea, considerando o subgrupo consórcios, em comparação ao tratamento controle. A medida de efeito utilizada foi a SMD (Standardized Mean Difference), que representa a diferença de médias padronizada entre os grupos. Os valores de SE (SMD) correspondem ao erro padrão associado a cada estimativa individual. O modelo estatístico adotado foi de efeitos aleatórios, com intervalo de confiança de 95% para cada estudo e para o efeito combinado.

6.7 Produtividade da soja

As gramíneas apresentaram um efeito médio pequeno e não significativo sobre a produtividade da soja (SMD = 0,06), com heterogeneidade considerada substancial ($I^2 = 75,4\%$) (Figura 19). Isso indica que, em média, as gramíneas não aumentaram significativamente a produtividade da soja, embora haja tendência de leve benefício. Estudos com melhor efeito: Pacheco *et al.* (2013a) *P. glaucum*: SMD = 0,4475, São Miguel *et al.* (2018) com *U. ruziziensis*: SMD = 0,3717 e *P. glaucum*: SMD = 0,3645, Pacheco *et al.* (2013b) *P. glaucum*: SMD = 0,1155. Efeitos nulos: Pacheco *et al.* (2013b) *U. ruziziensis*: SMD = -0,2092, Pires *et al.* (2020) *U. ruziziensis*: SMD = -0,0704 e Pacheco *et al.* (2017) Pousio em plantio direto: SMD = -0,1327.

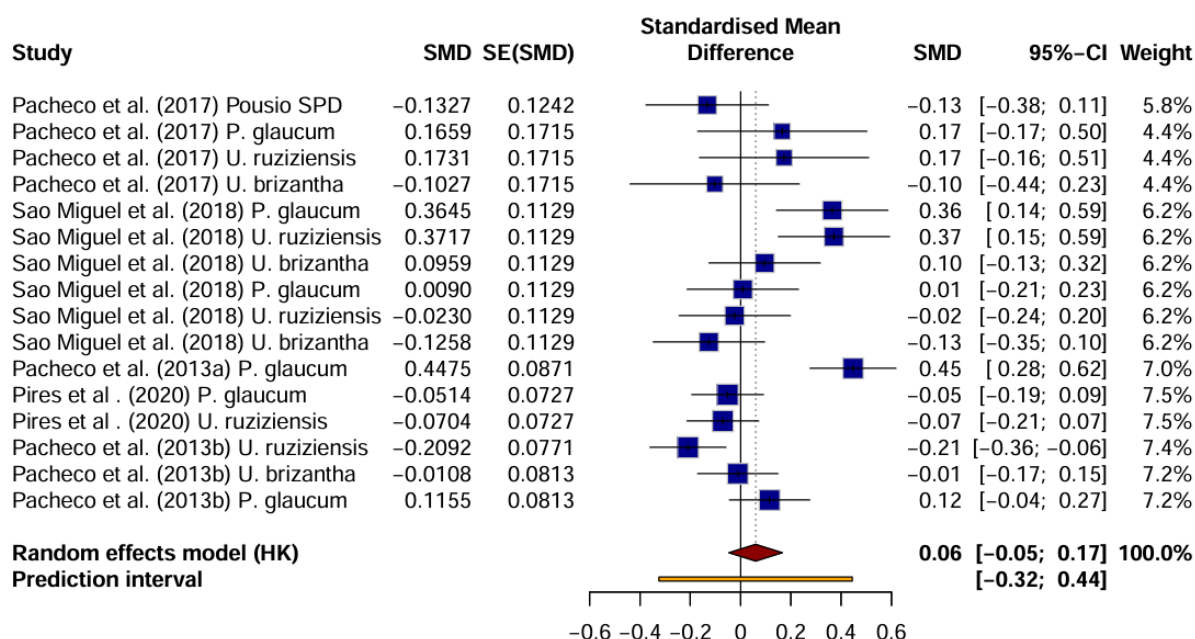


Figura 19: Forest plot da meta-análise sobre o efeito das culturas de cobertura na variável produtividade da soja, considerando o subgrupo gramíneas, em comparação ao tratamento controle. A medida de efeito utilizada foi a SMD (Standardized Mean Difference), que representa a diferença de médias padronizada entre os grupos. Os valores de SE (SMD) correspondem ao erro padrão associado a cada estimativa individual. O modelo estatístico adotado foi de efeitos aleatórios, com intervalo de confiança de 95% para cada estudo e para o efeito combinado.

A meta-análise revela que as leguminosas utilizadas como cobertura no SPD contribuem significativamente para aumentar a produtividade da soja em sucessão, ainda que com um efeito de pequena magnitude. O valor de $SMD = 0,19$ indica um efeito médio pequeno e estatisticamente significativo sobre a produtividade da soja em comparação ao controle (Figura 20). Estudos com impacto positivo: São Miguel *et al.* (2018) com *C. breviflora*: $SMD = 0,5556$, *C. cajan*: $SMD = 0,4533$ e *C. spectabilis*: $SMD = 0,3582$, Pacheco *et al.* (2017) com *C. spectabilis*: $SMD = 0,3582$ e *C. breviflora*: $SMD = 0,3570$. Efeitos nulos: Pires *et al.* (2020) *C. ochroleuca*: $SMD = -0,0528$, São Miguel *et al.* (2018) com *S. capitata*: $SMD = -0,0764$ e *C. cajan*: $SMD = -0,0108$. A heterogeneidade foi substancial ($I^2 = 74,9\%$).

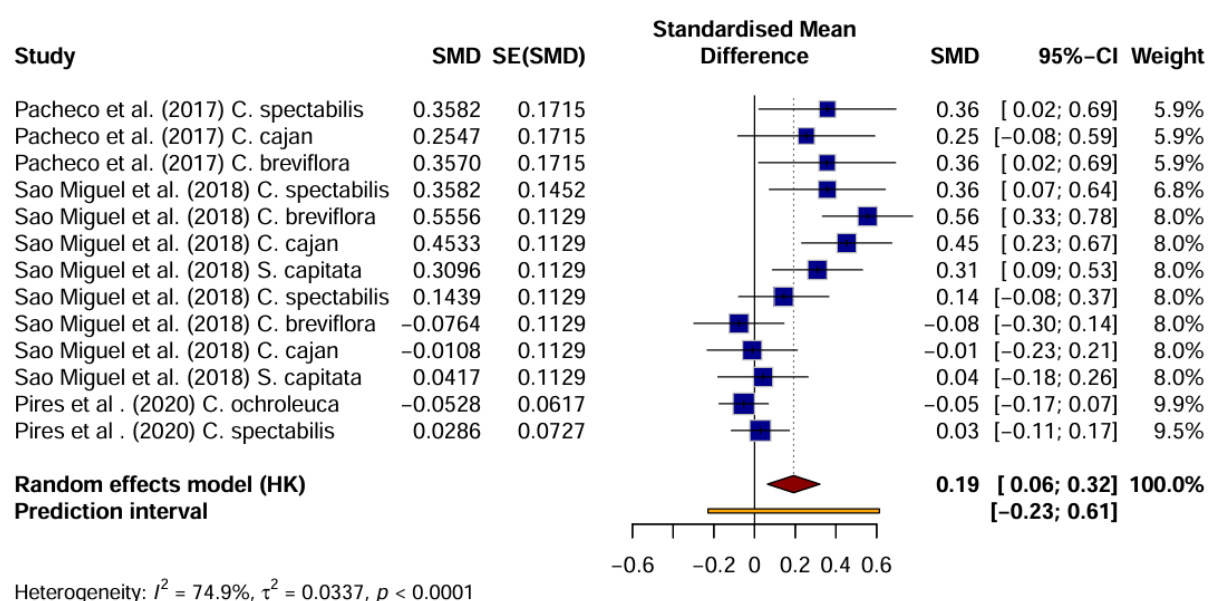


Figura 20: *Forest plot* da meta-análise sobre o efeito das culturas de cobertura na variável produtividade da soja, considerando o subgrupo leguminosas, em comparação ao tratamento controle. A medida de efeito utilizada foi a SMD (Standardized Mean Difference), que representa a diferença de médias padronizada entre os grupos. Os valores de SE (SMD) correspondem ao erro padrão associado a cada estimativa individual. O modelo estatístico adotado foi de efeitos aleatórios, com intervalo de confiança de 95% para cada estudo e para o efeito combinado.

Os consórcios apresentaram um efeito médio pequeno e não significativo ($SMD = 0,09$), com heterogeneidade considerável ($I^2 = 91,7\%$) (Figura XX). Apesar de alguns arranjos apresentarem efeitos positivos, como milho + *U. ruziziensis* ($SMD = 0,52$), a maioria dos consórcios avaliados teve impacto modesto ou nulo sobre a produtividade da soja. Casos como *U. ruziziensis* + *G. abyssinica* + *R. sativus* + *C. ochroleuca* apresentaram efeito negativo ($SMD = -0,13$), enquanto diversas combinações mostraram SMDs entre 0,01 e 0,21, sem significância estatística.

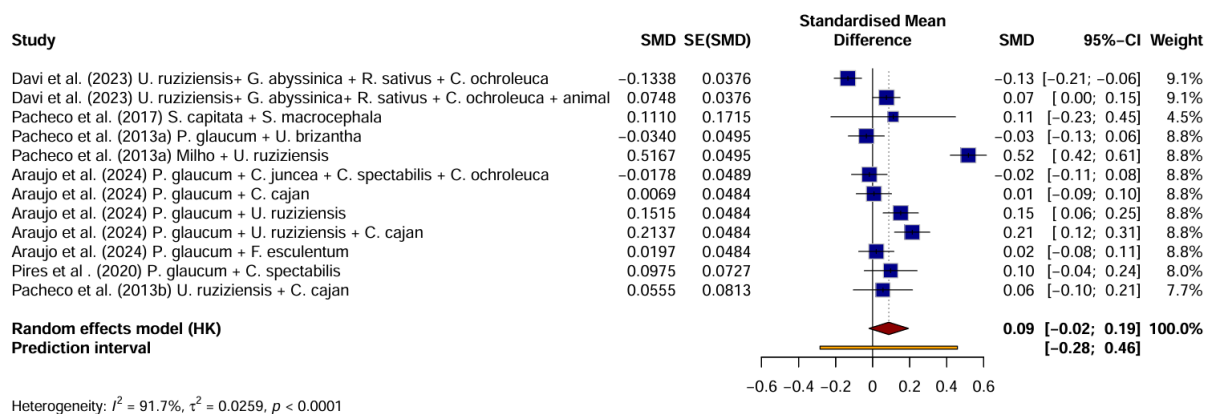


Figura 21: Forest plot da meta-análise sobre o efeito das culturas de cobertura na variável produtividade da soja, considerando o subgrupo consórcios, em comparação ao tratamento controle. A medida de efeito utilizada foi a SMD (Standardized Mean Difference), que representa a diferença de médias padronizada entre os grupos. Os valores de SE (SMD) correspondem ao erro padrão associado a cada estimativa individual. O modelo estatístico adotado foi de efeitos aleatórios, com intervalo de confiança de 95% para cada estudo e para o efeito combinado.

A *Urochloa ruziziensis* e *Pennisetum glaucum* foram as espécies com desempenho mais consistente entre as variáveis avaliadas, apresentando efeitos significativos na maioria dos indicadores, especialmente no acúmulo de nutrientes (N, P, K, Ca e Mg) e na produção de fitomassa aérea (Tabela 3). Apesar disso, seus efeitos sobre a produtividade da soja foram nulos. Entre as leguminosas, *Crotalaria spectabilis* e *Cajanus cajan* se destacaram por contribuírem de forma significativa tanto para o acúmulo de nutrientes quanto para a produtividade da soja, demonstrando maior potencial para serem usadas em segunda safra. Embora *Crotalaria breviflora* tenha apresentado efeitos negativos para os nutrientes, apresentou efeito significativo quanto a produtividade da soja. Os consórcios envolvendo milho com *U. ruziziensis* ou *C. spectabilis* mostraram efeitos significativos para a ciclagem de nutrientes e acúmulo de fitomassa aérea, mas não foi possível avaliar a produtividade da soja. Essa síntese contribui para evidenciar quais culturas apresentaram melhor desempenho e potencial de adaptação às diferentes condições edafoclimáticas observadas nos experimentos.

Tabela 3: Espécies de culturas de cobertura e respectivos estudos em que apresentaram os maiores impactos positivos nas variáveis analisadas (acúmulo de nutrientes, produção de fitomassa aérea e produtividade da soja), conforme resultados da meta-análise.

Espécie	Estudos Correspondentes	N	P	K	Ca	Mg	Fitomassa Aérea	Produtividade da Soja
<i>Urochloa ruziziensis</i>	Dalla Côt et al. (2021), Davi et al. (2023), São Miguel et al. (2018), Pires et al. (2020), Pacheco et al. (2013b)	+	+	+	+	+	+	-
<i>Pennisetum glaucum</i>	Dalla Côt et al. (2021), São Miguel et al. (2018), Pacheco et al. (2013a), Assis et al. (2016)	+	+	+	+	+	+	-
<i>Crotalaria spectabilis</i>	Dalla Côt et al. (2021), São Miguel et al. (2018), Pires et al. (2020), Pacheco et al. (2017)	+	+	-	+	+	-	+
<i>Cajanus cajan</i>	São Miguel et al. (2018), Pacheco et al. (2017)	+	+	-	+	+	+	+
<i>Vigna unguiculata</i>	Dalla Côt et al. (2021), Pires et al. (2020)	+	+	+	+	-	+	0
<i>Crotalaria breviflora</i>	São Miguel et al. (2018), Pacheco et al. (2017)	-	-	-	+	-	+	+
Milho + <i>U. ruziziensis</i>	Dalla Côt et al. (2021)	+	+	+	+	+	+	0
Milho + <i>C. spectabilis</i>	Dalla Côt et al. (2021)	+	+	+	+	+	+	0

“+” indica efeito positivo significativo; “-” indica efeito nulo ou não significativo; “0” não avaliado.

7 DISCUSSÃO

Houve uma ampla variabilidade entre os estudos que avaliaram culturas de cobertura em sistema plantio direto no Brasil (Figura 1). Essa heterogeneidade reflete a diversidade das condições edafoclimáticas, das espécies vegetais utilizadas, dos métodos de manejo e dos períodos de avaliação. Tal variabilidade metodológica e ambiental teve impacto direto na amplitude dos efeitos observados nas diferentes análises. Nesse contexto, a adoção de modelos de efeitos aleatórios mostrou-se adequada, uma vez que esses modelos consideram que os efeitos verdadeiros podem variar entre os estudos. A robustez dessa abordagem foi confirmada pelas estatísticas de heterogeneidade, que revelaram valores elevados de I^2 (acima de 75% em diversas análises), estatística Q significativa ($p < 0,001$) e estimativas expressivas de τ^2 , indicando a presença de variação real nos efeitos estimados (Higgins & Thompson, 2002; DerSimonian & Laird, 1986; Borenstein *et al.*, 2010).

A elevada heterogeneidade observada na presente meta-análise, expressa pelos altos valores de I^2 e τ^2 (Higgins e Thompson, 2002; Dike *et al.*, 2021), pode ser parcialmente atribuída à distribuição geográfica dos estudos incluídos, que abrangeram duas importantes regiões do Brasil: o Centro-Oeste (predominantemente Cerrado) e o Nordeste (Cerrado nordestino). Embora ambos os biomas compartilhem características savânicas, como vegetação adaptada à seca e solos com baixa fertilidade natural, existem distinções significativas em aspectos edáficos, fisiográficos e no histórico de uso agrícola (Santos *et al.*, 2018). Essas diferenças podem influenciar diretamente a produção de fitomassa, a ciclagem de nutrientes e a resposta da soja em sucessão, resultando em variabilidade real nos efeitos observados entre os estudos analisados.

Além disso, ainda que ambas as regiões apresentem um regime climático com duas estações bem definidas, uma chuvosa e outra seca, a distribuição, intensidade e duração das chuvas variam substancialmente entre elas. A maior irregularidade pluviométrica e o risco de veranicos mais prolongados no Cerrado nordestino, por exemplo, podem afetar a dinâmica de decomposição da palhada, a liberação de nutrientes e o desempenho das culturas de cobertura (De Albuquerque Cavalcanti e Ferreira, 2021). Essas variações climáticas, quando associadas a diferentes estratégias de manejo e épocas de semeadura, contribuem significativamente para o aumento da heterogeneidade entre os estudos, refletida estatisticamente nos elevados valores de I^2 e τ^2 encontrados nesta análise (DerSimonian e Laird, 1986; Dike *et al.*, 2021).

A diferença entre os tipos de solo entre os estudos pode influenciar diretamente o desenvolvimento das culturas de cobertura, a decomposição da palhada e a liberação de nutrientes, afetando também a resposta da soja em sucessão (Santos *et al.*, 2024; Sena *et al.*, 2021). Esse padrão sugere que, mesmo diante de variações regionais em clima, tipo de solo e manejo, determinadas espécies demonstraram maior adaptabilidade e eficiência funcional. Assim, a heterogeneidade, longe de invalidar os resultados (Borenstein *et al.*, 2010; Higgins e Thompson, 2002), evidencia a complexidade dos agroecossistemas estudados e reforça a importância de identificar espécies mais estáveis e resilientes, capazes de promover benefícios agronômicos em diferentes condições ambientais.

Observou-se que certas espécies apresentaram resultados significativos recorrentes, como *Urochloa ruziziensis*, *Pennisetum glaucum* e *Crotalaria spectabilis* (Tabela 3). Essas culturas foram citadas em múltiplos estudos, o que reforça sua versatilidade e eficiência em promover benefícios no SPD.

As gramíneas *Urochloa ruziziensis* e *Pennisetum glaucum* se destacaram quanto a ciclagem de nutrientes e na produção de fitomassa aérea devido a suas características morfofisiológicas (Pacheco *et al.*, 2017, São Miguel *et al.*, 2018). Ambas as espécies apresentam elevado vigor vegetativo, sistema radicular denso e profundo, além de alta relação C/N, o que favorece o acúmulo de biomassa e a imobilização temporária de nutrientes na palhada (Crusciol *et al.*, 2015; Souza *et al.*, 2022). A elevada produção de fitomassa, é essencial para proteção do solo, redução da temperatura e supressão de plantas daninhas, além de favorecer a ciclagem de nutrientes como K, Ca e Mg, que são menos dependentes da mineralização microbiana (Zhang *et al.*, 2025; Yan; Arthur, 2025).

Contudo, mesmo as gramíneas favorecendo a ciclagem de nutrientes, não necessariamente resultou em incremento da produtividade da soja. Como as gramíneas não realizam fixação biológica de nitrogênio (São Miguel *et al.*, 2018; Assis *et al.*, 2016), e nos estudos analisados não foram adubadas com N, não houve adição líquida desse nutriente ao sistema. Segundo Notaris *et al.* (2025), o nitrogênio residual do solo, e a capacidade de acumular N depende da fertilidade residual; em áreas com pouca fertilidade, essas espécies podem acumular pouco N e, portanto, terão pouco a liberar para a cultura seguinte. Em cultivos onde a adubação segue apenas os parâmetros da análise química do solo, sem considerar a decomposição da palhada, pode ocorrer deficiência inicial de nitrogênio na soja, principalmente em solos com baixa mineralização (Franchini *et al.*, 2011, Opuku *et al.*, 2024). Além disso, a palhada com alta relação C/N pode retardar a liberação de N e temporariamente limitar sua

disponibilidade às culturas subsequentes, o que pode explicar os efeitos discretos observados na meta-análise com relação a essas espécies sobre a produtividade da soja.

As leguminosas *Cajanus cajan*, e, principalmente, *Crotalaria spectabilis* apresentaram efeitos significativos na ciclagem de nutrientes e na produtividade da soja, mesmo sem se destacarem em produção de fitomassa aérea. Esse comportamento pode ser explicado por características fisiológicas como rápido crescimento inicial, elevada taxa de FBN, como fixam o N atmosférico por meio de simbiose com rizóbios; isso significa que o acúmulo de N é menos dependente da fertilidade do solo. E com a maior proporção de tecidos com baixa relação C/N, resulta em uma palhada com elevada qualidade nutricional e de rápida decomposição (Zhang *et al.*, 2025; Chen *et al.*, 2024). A fixação simbiótica de N, especialmente com rizóbios, representa uma importante via de entrada de nitrogênio no sistema, beneficiando diretamente a soja cultivada em sucessão (Silva *et al.*, 2021).

Além disso, leguminosas contribuem significativamente para a atividade microbiana do solo e a estabilização da matéria orgânica, especialmente quando associadas a sistemas com menor aporte externo de N (Chen *et al.*, 2024; Connell *et al.*, 2025). Embora não tenham gerado grandes volumes de fitomassa aérea, a qualidade da palhada foi determinante para os efeitos positivos observados. Pode ter ocorrido o aumento da atividade enzimática e da biomassa microbiana que estimula a mineralização do N, promovendo um ambiente mais favorável ao desenvolvimento da soja. Os estudos de Dalla Côt *et al.* (2021) e São Miguel *et al.* (2018) apontam que o sincronismo entre a liberação de N e a demanda da soja é essencial. Isso reforça que, mais do que a quantidade de fitomassa, a qualidade do resíduo e sua sincronia com a demanda da cultura subsequente são essenciais para o sucesso e aumento da produtividade.

Algumas das espécies leguminosas que apresentaram impactos mais modestos na meta-análise, como *Stylosanthes capitata*, *Crotalaria breviflora*, *Crotalaria ochroleuca* e *Vigna unguiculata*, possuem particularidades fisiológicas que ajudam a explicar esses resultados. Embora todas leguminosas sejam capazes de fixar N atmosférico, elas diferem bastante em crescimento e acúmulo de fitomassa. Segundo São Miguel *et al.* (2018) estas espécies acumulam N de acordo com a quantidade de fitomassa produzida. Além disso, apresentam crescimento inicial lento e associado a menor quantidade de fitomassa produzida, desfavorece o acúmulo de N e outros nutrientes.

Os consórcios envolvendo milho com *U. ruziziensis* ou *C. spectabilis* apresentaram os maiores valores de acúmulo de nutrientes e produção de fitomassa aérea. Essa sinergia ocorre pela complementaridade entre grupos funcionais: enquanto as gramíneas aportam grande volume de palhada e promovem cobertura do solo, as leguminosas contribuem com a entrada

de nitrogênio via fixação biológica (Silva *et al.*, 2021; Connell *et al.*, 2025). Esse arranjo funcional favorece o aproveitamento dos recursos ambientais (água, luz e nutrientes), resultando em maior eficiência de uso do solo e maior acúmulo de fitomassa e nutrientes em menor tempo.

Apesar do alto desempenho observado nesses consórcios, a ausência de dados sobre a produtividade da soja nos estudos analisados limita a avaliação de seus impactos diretos sobre a cultura sucessora. No entanto, estudos prévios indicam que a diversificação de espécies, especialmente em arranjos consorciados, tende a promover maior estabilidade do sistema e melhora nos atributos biológicos e químicos do solo (Chieza *et al.*, 2020; Castro *et al.*, 2022; Rose *et al.*, 2024). Assim, mesmo sem resultados diretos sobre o rendimento da soja, o desempenho superior desses consórcios quanto à ciclagem e à cobertura aponta para seu potencial como estratégia de manejo integrada no SPD.

8 CONCLUSÃO

1. O uso de culturas de cobertura em SPD promove benefícios consistentes no acúmulo de fitomassa aérea e na ciclagem de nutrientes.
2. Apesar da heterogeneidade entre os estudos, foi possível identificar espécies adaptadas a diferentes condições edafoclimáticas, reforçando a importância das culturas de cobertura para a sustentabilidade e eficiência do sistema plantio direto.
3. Gramíneas como *U. ruziziensis* e *P. glaucum* se destacaram pela elevada produção de biomassa e capacidade de ciclagem de nutrientes.
4. Entre as leguminosas, *C. spectabilis*, apresentou efeitos significativos sobre o acúmulo de nutrientes e produtividade da soja.

REFERÊNCIAS

- ASSIS, R. L. de; BOER, C. A.; PACHECO, L. P.; BRAGA PEREIRA BRAZ, A. J.; DE PINHO COSTA, K. A.; RODRIGUES TORRES, J. L. Produção e decomposição de biomassa de plantas de cobertura cultivadas na primavera. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 11, n. 1, p. 104-112, jan./mar. 2016. DOI: <https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2016v31n4p328-333>.
- BATTISTI, I. D. E.; DA SILVA SMOLSKI, M. **Software R: análise estatística de dados utilizando um programa livre**. Bagé: Faith, 2019.
- BORENSTEIN, M.; HEDGES, L. V.; HIGGINS, J. P.; ROTHSTEIN, H. R. **Introduction to meta-analysis**. Chichester: Wiley, 2009.
- BORENSTEIN, M.; HEDGES, L. V.; HIGGINS, J. P.; ROTHSTEIN, H. R. **Introduction to meta-analysis**. John Wiley & Sons, 2021.
- CAVALCANTI, I. F. de A.; FERREIRA, N. J. **Clima das regiões brasileiras e variabilidade climática**. São Paulo: Oficina de Textos, 2021.
- CHEN, J.; SAINJU, U. M.; LIU, R.; TAN, G.; WEN, M.; ZHAO, J. *et al.* Winter legume cover crop with adequate nitrogen fertilization enhance dryland maize yield and water-use efficiency. **Agricultural Water Management**, v. 306, p. 109209, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109209>.
- COHEN, Jacob. **Statistical power analysis for the behavioral sciences**. Routledge, 2013.
- CONNELL, R. K.; JAMES, T. Y.; BLESCH, J. A legume-grass cover crop builds mineral-associated organic matter across variable agricultural soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 203, p. 109726, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2025.109726>.
- CRUSCIOL, C. A.; NASCENTE, A. S.; BORGHI, E.; SORATTO, R. P.; MARTINS, P. O. Melhorando a fertilidade do solo e o rendimento das culturas em uma região tropical com culturas de cobertura de capim-paliçada. **Revista de Agronomia**, v. 107, n. 6, p. 2271-2280, 2015. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj14.0603>.
- DALLA CORT, J.; LIMA, C. L. R.; KICHEL, A. N.; MÜLLER, L.; WOBETO, C. Accumulation and efficiency in the nutrients use by production systems in second season under no-tillage. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 56, e02310, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2021.v56.02310>.
- DAVI, H. M. R.; SILVA, A. G.; OLIVEIRA, J. L.; FERNANDES, A. R.; TORRES, J. L. R. Diversified production systems in sandy soils of the Brazilian Cerrado: nutrient dynamics and soybean productivity. **Soil and Tillage Research**, v. 230, 105026, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105026>.
- DE NOTARIS, C.; PEIXOTO, L.; MORTENSEN, E. Ø.; RASMUSSEN, J. Cover crop biomass production as a predictor of nitrogen fertilizer replacement value-legumes secure positive effects. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 381, p. 109446, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.109446>.

DEEKS, J. J.; HIGGINS, J. P. T.; ALTMAN, D. G. Chapter 10: **Analysing data and undertaking meta-analyses**. In: HIGGINS, J. P. T. *et al.* (ed.). *Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions*. version 6.4 (updated August 2023). Cochrane, 2023. Disponível em: <https://www.training.cochrane.org/handbook>.

DerSimonian, R., & Laird, N. Meta-analysis in clinical trials. **Controlled clinical trials**, v. 7, n. 3, p. 177-188, 1986. DOI: [https://doi.org/10.1016/0197-2456\(86\)90046-2](https://doi.org/10.1016/0197-2456(86)90046-2).

GALVÃO, T. F.; PEREIRA, M. G. Revisões sistemáticas da literatura: passos para sua elaboração. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, v. 23, n. 1, p. 183–184, 2014. DOI: <https://doi.org/10.5123/S1679-49742014000100018>.

GARBA, I. I.; BELL, L. W.; WILLIAMS, A. Cover crop legacy impacts on soil water and nitrogen dynamics, and on subsequent crop yields in drylands: a meta-analysis. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 42, n. 3, p. 34, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00760-0>.

HARRER, M. CUIJPERS, P.; FURUKAWA, T.; EBERT, D. Doing Meta-Analysis with R: A Hands-On Guide (1st ed.). **Chapman and Hall/CRC**, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003107347>.

HIGGINS, J. P. T.; HIGGINS, J. P.; THOMPSON, S. G.; DEEKS, J. J.; ALTMAN, D. G. Measuring inconsistency in meta-analyses. **BMJ**, v. 327, n. 7414, p. 557–560, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1136/bmj.327.7414.557>.

KORICHEVA, J.; GUREVITCH, J.; MENGERSEN, K. **Handbook of meta-analysis in ecology and evolution**. Princeton: Princeton University Press, 2013.

LIMA, A. V.; COSTA, D. P. D.; SIMÕES, L. R.; BARROS, J. A. D.; SILVA, V. P. D.; LIMA, J. R. D. S. Revitalizing fertility of global soils: Meta-analysis on benefits of poultry litter biochar on soil health. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 28, n. 12, e278204, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v28n12e278204>.

MARCONDES, R.; DA SILVA, S. L. R. O protocolo Prisma 2020 como uma possibilidade de roteiro para revisão sistemática em ensino de ciências. **Revista Brasileira de Pós-Graduação**, v. 18, n. 39, p. 1–19, 2023. DOI: <https://doi.org/10.21713/rbpg.v18i39.1894>.

MOHER, D. *et al.* Itens de relatório preferidos para revisões sistemáticas e meta-análises: a declaração PRISMA. **International Journal of Surgery**, v. 8, p. 336–341, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijssu.2010.02.007>.

MORAIS, M. C.; SILVA, C. A.; OLIVEIRA, F. L.; FERREIRA, J. A.; GUIMARÃES, G. P. Maize intercropping systems improve nutrient availability for the cowpea crop in sandy soils. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 20, p. 299–308, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00109-y>.

OPOKU, A.; OGUNLEYE, A. M.; SOLOMON, J. K.; PAYNE, W. A. Cover crop systems impact on biomass production, carbon-to-nitrogen ratio, forage quality, and soil health in a semi-arid environment. **Heliyon**, v. 10, n. 20, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39600>.

PACHECO, L. P.; PETTER, F. A.; PROCOPIO, S. O.; CECON, P. R.; SANTOS, J. B. Produção de fitomassa e acúmulo de nutrientes por plantas de cobertura no cerrado piauiense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 1023–1033, 2013a. DOI: <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20160174>.

PACHECO, L. P.; PETTER, F. A.; PROCOPIO, S. O.; CECON, P. R.; SANTOS, J. B. Ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura na entressafra. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 1776–1785, 2013b. DOI:

PACHECO, L. P.; PETTER, F. A.; VICTORIA FILHO, R.; SOUZA, C. M. A. Produção de fitomassa em sistemas de produção de soja em sucessão a culturas e plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, e0160174, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20160174>.

PAULO, J.; BARARI, M. Meta-análise e revisões sistemáticas tradicionais da literatura: O quê, por que, quando, onde e como?. **Psicologia e Marketing**, v. 39, n. 6, p. 1099–1115, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/mar.21657>.

PIRES, C. D.; CORREIA, M. E. F.; SANTOS, G. A.; PEREIRA, M. G.; FREITAS, A. R. Conservation system improves soil microbial quality and maize–soybean yield. **Soil and Tillage Research**, v. 199, 104577, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104577>.

ROSE, T. J.; PARVIN, S.; MCINNES, J.; VAN ZWIETEN, L.; GIBSON, A. J.; KEARNEY, L. J.; ROSE, M. T. Summer cover crop and temporary legume-cereal intercrop effects on soil microbial indicators, soil water and cash crop yields in a semi-arid environment. **Field Crops Research**, v. 312, p. 109384, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109384>.

SANTOS, L. P. C.; SANTOS, A. J. M.; BACKES, C.; TEODORO, A. G.; TOMAZELLO, D. A.; SOUSA, J. E. R. Liberação de nutrientes e decomposição da palhada de capim solteiro e capim + feijão guandu no período de desenvolvimento da cultura da soja. **Observatório de la Economía Latinoamericana**, v. 22, n. 10, e7496, 2024. DOI: <https://doi.org/10.55905/oelv22n10-259>.

SÃO MIGUEL, A. S.; PETTER, F. A.; PACHECO, L. P.; PROCOPIO, S. O.; CECON, P. R. Fitomassa e liberação de nutrientes em sistemas de cultivo de soja sob plantio direto. **Revista Agroambiente On-line**, v. 12, n. 1, p. 19–28, 2018. DOI: <https://doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v12i1.4774>.

SCHWARZER, G.; CARPENTER, J. R.; RÜCKER, G. **An introduction to meta-analysis in R**. Meta-analysis with R, p. 3-17, 2015.

SENA, C. C. R. DA SILVA, G. C.; EVANGELISTA, Z. R.; NUNES, M. E.; PEGO, A. W. E. Atributos físico-hídricos de solos do Cerrado. **Revista Agrotecnologia-Agrotec**, v. 12, n. 1, p. 80-91, 2021.

SILVA, M. A.; NASCENTE, A. S.; FRASCA, L. L. D. M.; LANNA, A. C.; LACERDA, M. C.; SILVA, C. B. D. Biomass, nutrient accumulation, and weed suppression by mix of cover crops. **Revista Caatinga**, v. 36, n. 4, p. 757-764, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-21252023v36n403rc>.

SILVA, M. A.; NASCENTE, A. S.; FRASCA, L. L. de M.; REZENDE, C. C.; FERREIRA, E. A. S.; FILIPPI, M. C. C. de; LANNA, A. C.; FERREIRA, E. P. de B.; LACERDA, M. C.

Isolated and mixed cover crops to improve soil quality and commercial crops in the Cerrado. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 12, p. e11101220008, 2021. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i12.20008>.

TORRES, J. L. R.; GOMES, F. R. D. C.; BARRETO, A. C.; ORIOLI JUNIOR, V.; FRANÇA, G. D.; LEMES, E. M. Ciclagem de nutrientes de diferentes resíduos vegetais e doses de fertilizantes no cultivo de brócolis. *Horticultura Brasileira*, v. 39, p. 11-19, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0102-0536-20210102>

VIECHTBAUER, W. Conducting meta-analyses in R with the metafor package. **Journal of Statistical Software**, v. 36, p. 1-48, 2010. DOI: <https://doi.org/10.18637/jss.v036.i03>.

YAN, X.; ARTHUR, E. Cover crops alter soil physicochemical properties: A global meta-analysis. **Geoderma**, v. 460, p. 117436, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2025.117436>.

ZHANG, Z.; DONG, Y.; YANG, D.; LU, M.; ZHANG, W.; DING, X.; HE, H. Divergent effects of legume cover crops on microbial necromass accumulation at surface versus subsurface soils in subtropical paddy fields. **Journal of Environmental Management**, v. 389, p. 126181, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.126181>.

9 CAPÍTULO II: Roçagem mecânica em culturas de cobertura no sistema plantio direto como estratégia para produção de fitomassa aérea e radicular

RESUMO

As práticas agrícolas sustentáveis como o SPD, embora representem um passo importante em direção à conservação de recursos naturais, ainda enfrentam desafios significativos quanto a sua eficiência, exigindo inovação contínua garantindo sua viabilidade e eficácia a longo prazo. Nesse contexto, o estudo de estratégias de manejo, como a roçagem mecânica, bem como a seleção de espécies para diversificação florística por meio de culturas de cobertura na segunda safra, torna-se uma ferramenta essencial para aprimorar a eficiência no uso dos recursos em sistemas de produção agrícola. Diante disso, objetivou-se verificar se a roçagem mecânica das culturas de cobertura favorece a ciclagem de nutrientes e aumentar a produtividade da soja em sistema de plantio direto. O experimento foi conduzido na Universidade Federal de Rondonópolis. Os dados analisados correspondem às safras 2022/23 e 2023/24. O delineamento experimental adotado foi em blocos casualizados, com quatro sistemas de produção e quatro repetições. Os tratamentos foram definidos da seguinte forma: T1: *Crotalaria spectabilis* + *Pennisetum glaucum* + *Urochloa ruziziensis* + *Cajanus cajan* sem roçagem mecânica; T2: *Crotalaria spectabilis* + *Pennisetum glaucum* + *Urochloa ruziziensis* + *Cajanus cajan* com roçagem mecânica; T3: *Urochloa ruziziensis* sem roçagem mecânica; T4: *Urochloa ruziziensis* com roçagem mecânica. Os tratamentos T2 e T4 demonstraram um elevado acúmulo de massa seca de raízes na camada superficial do solo (0,00-0,05 m) quando as culturas de cobertura foram submetidas ao manejo mecânico por roçagem, apresentando um aumento de 158% e 119%. O consórcio com as quatro espécies de culturas de cobertura, sem a aplicação da roçagem mecânica (T1), apresentou o maior potencial de produção de fitomassa aérea (7410,6 kg ha⁻¹). O tratamento T2, submetido à roçagem mecânica, destacou-se no acúmulo de todos os nutrientes avaliados (N, P, K, Ca e Mg), evidenciando que o manejo por meio da roçagem, quando associado ao consórcio de culturas de cobertura, configura-se como uma estratégia eficiente para maximizar a ciclagem de nutrientes. Além disso, os tratamentos T1 (3416,4 kg ha⁻¹), T2 (3511,7 kg ha⁻¹) e T4 (3346,8 kg ha⁻¹) exerceram influência positiva sobre a produtividade da soja cultivada em sucessão. A roçagem se mostra, portanto, uma técnica promissora para intensificar o aproveitamento dos recursos naturais prestados pelas culturas de cobertura em sistema plantio direto.

Palavras-chave: Ciclagem de nutrientes; soja, *Urochloa ruziziensis*.

Mechanical cutting in cover crops in no-tillage system as a strategy to increase the production of area and root phytomass

ABSTRACT

Sustainable agricultural practices such as NTS, while representing an important step toward conserving natural resources, still face significant challenges regarding their efficiency, requiring continuous innovation to ensure their long-term viability and effectiveness. In this context, the study of management strategies, such as mechanical mowing, as well as the selection of species for floristic diversification through cover crops in the second harvest, becomes an essential tool for improving resource efficiency in agricultural production systems. Therefore, the objective was to verify whether mechanical mowing of cover crops favors nutrient cycling and increases soybean productivity in a no-tillage system. The experiment was conducted at the Federal University of Rondonópolis. The data analyzed correspond to the 2022/23 and 2023/24 harvests. The experimental design adopted was a randomized complete block design, with four production systems and four replicates. The treatments were defined as follows: T1: *Crotalaria spectabilis* + *Pennisetum glaucum* + *Urochloa ruziziensis* + *Cajanus cajan* without mechanical mowing; T2: *Crotalaria spectabilis* + *Pennisetum glaucum* + *Urochloa ruziziensis* + *Cajanus cajan* with mechanical mowing; T3: *Urochloa ruziziensis* without mechanical mowing; T4: *Urochloa ruziziensis* with mechanical mowing. Treatments T2 and T4 demonstrated a high accumulation of root dry mass in the surface soil layer (0.00-0.05 m) when the cover crops were subjected to mechanical mowing management, presenting an increase of 158% and 119%. The intercropping with the four cover crop species, without the application of mechanical mowing (T1), presented the highest potential for aboveground phytomass production (7410.6 kg ha⁻¹). Treatment T2, subjected to mechanical mowing, excelled in the accumulation of all evaluated nutrients (N, P, K, Ca, and Mg), demonstrating that mowing management, when combined with cover crop intercropping, is an efficient strategy for maximizing nutrient cycling. Furthermore, treatments T1 (3,416.4 kg ha⁻¹), T2 (3,511.7 kg ha⁻¹), and T4 (3,346.8 kg ha⁻¹) positively influenced the productivity of soybean grown in succession. Therefore, mowing appears to be a promising technique for intensifying the use of natural resources provided by cover crops in a no-tillage system.

Keywords: Nutrient cycling; soybean; *Urochloa ruziziensis*.

10 INTRODUÇÃO

Em diversos sistemas produtivos ao redor do mundo, a intensificação agrícola tem sido marcada pelo uso contínuo de monoculturas e práticas de manejo que, embora eficientes no curto prazo, comprometem a sustentabilidade a longo prazo (Sprey *et al.*, 2025). Essas práticas tem contribuído para o esgotamento dos recursos naturais, degradação do solo, redução da biodiversidade funcional e maior vulnerabilidade dos agroecossistemas frente às mudanças climáticas (Silva *et al.*, 2022; Ozório *et al.*, 2024). Em particular, a deterioração dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo tem reduzido a eficiência do uso de insumos, limitado o potencial produtivo das culturas e ampliado os riscos ambientais (Lamas, 2021, Opuku *et al.*, 2024). Nesse cenário, estratégias baseadas em princípios agroecológicos, como a rotação de culturas, o uso de plantas de cobertura e o fortalecimento da resiliência dos sistemas agrícolas, têm sido cada vez mais recomendadas para garantir a produtividade de forma sustentável em distintas regiões.

Nesse contexto, práticas conservacionistas como o SPD, aliadas ao uso diversificado de culturas de cobertura, têm se destacado como estratégias promissoras para reverter esse cenário, recuperar a fertilidade do solo e garantir a sustentabilidade da produção de grãos (Silva *et al.*, 2021; Chaveiro *et al.*, 2022). A diversificação de espécies por meio do consórcio no SPD tem se mostrado uma estratégia agronomicamente eficiente para promover melhorias nos atributos físicos, químicos e biológicos do solo, por meio da combinação de espécies de diferentes grupos funcionais (Scavazza *et al.*; 2018; Dalla Còrt *et al.*, 2021; Larkin, 2024).

Para que os benefícios proporcionados pelo consórcio de plantas de cobertura sejam plenamente aproveitados no SPD, é essencial o uso de práticas de manejo que favoreçam a liberação equilibrada dos nutrientes acumulados na fitomassa (Silva *et al.*, 2021; Dalla Còrt *et al.*, 2025). Nesse sentido, a roçagem mecânica das culturas de cobertura surge como uma alternativa promissora para promover o aumento da fitomassa aérea e radicular, e ciclagem de nutrientes.

O corte da parte aérea das plantas por meio da roçagem mecânica é uma prática que favorece a deposição escalonada da palhada depositada sobre o solo, o que acelera o processo de decomposição dos resíduos vegetais. Esse efeito pode resultar em maior taxa de mineralização dos nutrientes acumulados na fitomassa, promovendo sua liberação de forma mais rápida. Além disso, ao simular o efeito do pastejo, já amplamente documentado em sistemas de integração lavoura-pecuária, a roçagem irá estimular a rebrotação das espécies de cobertura, prolongando seu ciclo vegetativo (Wang *et al.*, 2017; Somenahally *et al.*, 2020). A

rebrotagem contínua promove novo acúmulo de biomassa aérea e radicular, em que contribuir para a renovação da rizosfera e para o aporte de matéria orgânica.

Como consequência, a soja cultivada após a roçagem mecânica realizada na culturas de cobertura pode se beneficiar de um ambiente edáfico mais fértil, estruturado e biologicamente ativo, com aumento da matéria orgânica, maior disponibilidade de nutrientes (como N, P, K, Ca e Mg), maior infiltração e retenção de água, sequestro de carbono e formação de bioporos. Esses fatores favorecem o desenvolvimento radicular, o vigor vegetativo e o aproveitamento eficiente dos recursos do solo, resultando em incrementos na produtividade e na estabilidade da soja (Silva *et al.*, 2021). Dessa forma, quando associada à diversificação funcional de espécies em consórcio, a roçagem mecânica potencializa os benefícios ao solo, intensifica os processos biogeoquímicos, amplia a eficiência do sistema e fortalece a sustentabilidade agrônômica do SPD.

Diante desse contexto, objetivou-se com o presente estudo avaliar se a roçagem mecânica potencializa a ciclagem de nutrientes, por meio da produção de fitomassa aérea e radicular em culturas anuais e de cobertura, sob diferentes níveis de diversidade de espécies, sob o sistema plantio direto no Cerrado.

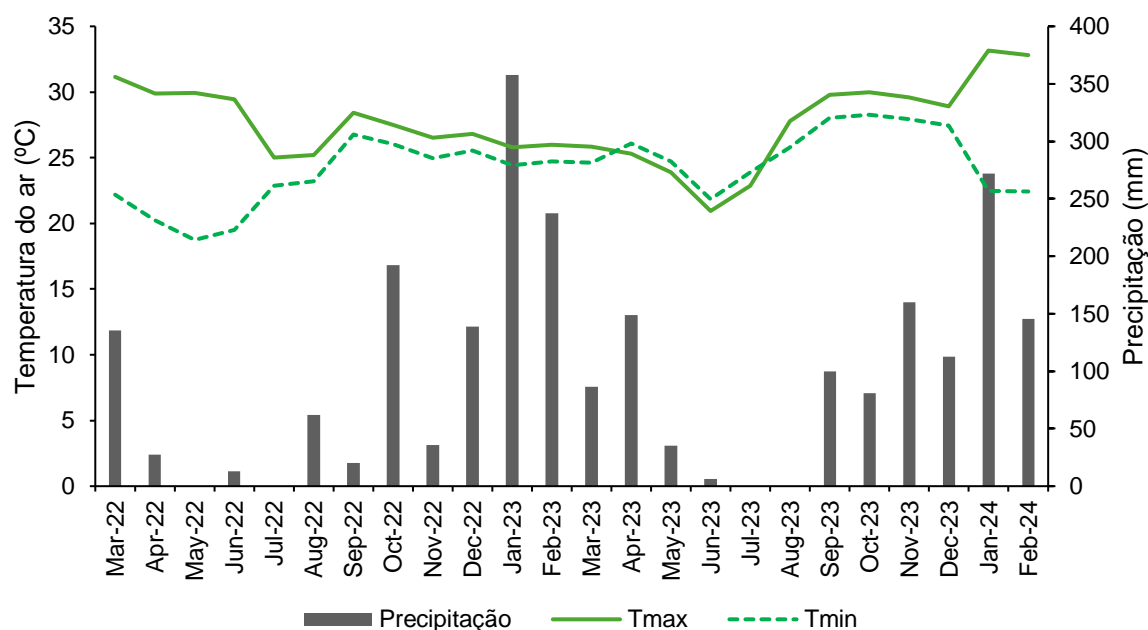


Figura 23: Climograma das variáveis meteorológicas registradas ao longo do período de realização do experimento, em Rondonópolis, MT, safras 2022/23 e 2023/24.

O solo da área é classificado como Latossolo Vermelho distrófico (Santos *et al.*, 2018). Inicialmente, foi preciso fazer a abertura da área, que se encontrava com cobertura vegetal (Cerrado). Antes da implantação do experimento na área, foram coletadas amostras de solo para avaliação da fertilidade do solo e definir características químicas e texturais (Tabela 3).

Tabela 4: Caracterização química e textural do Latossolo Vermelho Distrófico na abertura da área para o experimento em 2013.

Profundidade (m)	pH	P	K	Ca	Mg	H+Al	T	V	MO	Areia	Silte	Argila
	CaCl ₂	-mg dm ⁻³				Cmol _c dm ⁻³		%		-g kg ⁻¹		
0,00-0,10	4,1	5,4	55	0,5	0,2	6,8	7,6	11	17,6	450	125	425
0,10-0,20	4,0	1,4	49	0,2	0,2	7,2	7,6	5,6	19,9	500	100	400
0,20-0,30	4,1	0,2	31	0,3	0,1	6,2	6,7	7,2	13,7	500	100	400

P: fósforo disponível (Mehlich 1); K, Ca e Mg trocáveis, T: capacidade de troca de cátions a pH 7,0; V: saturação por bases.

Após a obtenção e análise de solo, realizou-se a calagem com 1.800 kg de calcário Filler na área, para elevar a saturação por base a 60%. Em seguida, o solo foi o preparo no sistema convencional, com aração e duas gradagens.

11.2 Delineamento experimental

O experimento foi conduzido em delineamento de blocos casualizados, com quatro sistemas de produção (Tabela 4) e quatro repetições, totalizando 16 parcelas. Cada parcela possuiu dimensões de 7,00 m × 9,00 m. Na segunda safra, foram utilizadas culturas de cobertura em cultivos solteiros e consorciados. Na safra principal, a soja foi semeada como cultura comercial (tabela 4).

Tabela 5: Caracterização dos tratamentos implementados na segunda safra em sistema plantio direto.

Tratamento	Plantas de cobertura	Manejo	Safra
T1	<i>Crotalaria spectabilis</i> + <i>Pennisetum glaucum</i> + <i>U. ruziziensis</i> + <i>Cajanus cajan</i>	Sem roçagem mecânica	Soja
T2	<i>Crotalaria spectabilis</i> + <i>Pennisetum glaucum</i> + <i>U. ruziziensis</i> + <i>Cajanus cajan</i>	Com roçagem mecânica	Soja
T3	<i>Urochloa ruziziensis</i>	Sem roçagem mecânica	Soja
T4	<i>Urochloa ruziziensis</i>	Com roçagem mecânica	Soja

As culturas de cobertura semeadas na segunda safra foram implantadas após a aplicação de glifosato (1080 g i. a. ha⁻¹), com o objetivo de evitar a emergência de plantas invasoras. O plantio foi realizado manualmente em ambos os anos (02/03/2022 e 27/02/2023), em sistema de plantio direto, com espaçamento de 0,45 m entre linhas.

O manejo das culturas de cobertura na safrinha foi avaliado por meio de dois métodos: a roçagem mecânica, realizada nos tratamentos T2 e T4, enquanto nos tratamentos T1 e T3 não houve a utilização desse manejo. A roçagem das culturas ocorreu aos 51 dias após a semeadura no primeiro ano de estudo (safra 2022/23), em 22/04/2022, utilizando uma roçadora motorizada manual, modelo Stihl FS 160 (figura 25). No segundo ano, a roçagem foi realizada aos 53 dias após a semeadura, em 21/04/2023. Em ambos os anos, o corte das culturas foi feito a uma altura de 0,25 m do solo, com o objetivo de simular o efeito do pastejo animal.



Figura 24: Corte realizado nas culturas de cobertura por meio da roçagem mecânica. Fonte: Autoria própria (2023)

A dessecação foi realizada na ocasião da senescência das culturas de cobertura, utilizando glifosato na dose de $1080 \text{ g i.a ha}^{-1}$. A aplicação ocorreu em 25/06/2022 e 14/06/2023, correspondendo a 115 e 107 dias após a semeadura, respectivamente.

Para o plantio mecanizado da soja, houve uma dessecação (glifosato $1080 \text{ g i.a ha}^{-1}$) três dias antes, em que ocorreu em 23/10/2022 no primeiro ano e em 03/10/2023 para o segundo ano de condução. A soja foi semeada em plantio direto em todos os sistemas de produção, a cultivar utilizada foi a BMX OLIMPO para ambas as safras, sendo 13 sementes por metro linear, com espaçamento de 0,45m (figura 26).



Figura 25: Semeadura da soja durante o período da safra. Fonte: Autoria própria (2023)

Quanto a adubação, foi distribuído no sulco de semeadura 60 kg ha^{-1} de P_2O_5 via MAP e 60 kg ha^{-1} de K_2O via KCl, aplicados metade a lanço em pré semeadura e o restante durante o estágio fenológico V4. Antes da colheita da soja ocorreu a dessecação em 17/02/2023 e 07/02/2024 com 2-4D (2 L ha^{-1}). Após, a colheita foi realizada de forma manual em ambos os anos.

11.3 Variáveis analisadas

Foram avaliadas a produção de massa seca de raízes (MSR), massa seca da parte aérea (MSPA), acúmulo e liberação de nutrientes das culturas de cobertura e produtividade da soja.

A avaliação da produção de raízes foi realizada em 08/07/2022 e 09/06/2023, em que foram coletadas 40 amostras de solo por parcela, na linha e na entrelinha de semeadura das culturas formando uma amostra composta para cada uma das camadas de 0.00-0.05, 0.05-0.10, 0.10-0.20, 0.20-0.30 e 0.30-0.40 m de profundidade. A coleta foi realizada utilizando um trado modelo sonda, em duas áreas aleatórias dentro das parcelas, com quatro pontos cada (figura 28).

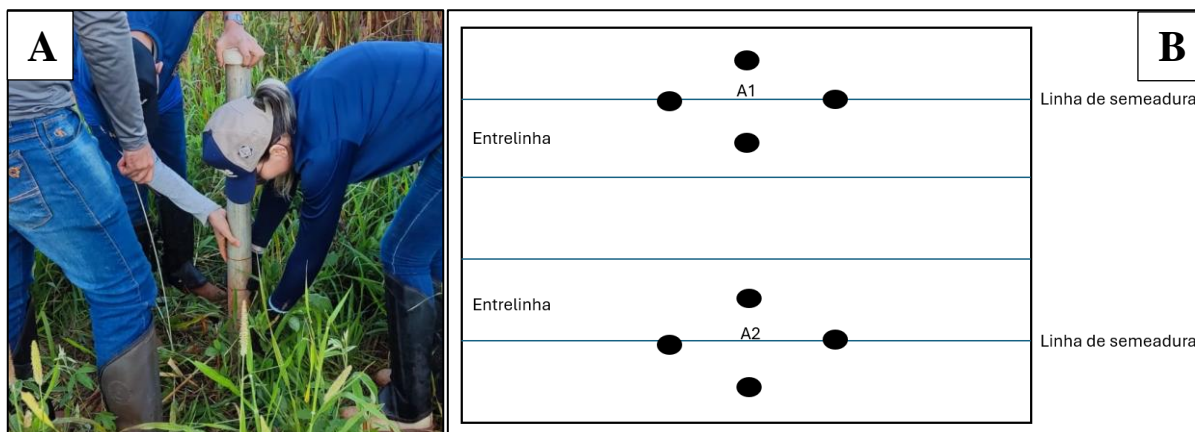


Figura 26: Coleta de raízes (A); representação das áreas de coleta de massa seca de raízes (B). Fonte: Autoria própria (2023)

Posteriormente, as amostras foram armazenadas em casa de vegetação para a secagem ao ar, após foi realizada a separação das raízes do solo de forma manual com o auxílio de uma pinça (figura 29). Com isso, foi feita a secagem das amostras de raízes em estufa a 65 °C por um período de 48 horas, as amostras foram pesadas, e determinada a MSR e extrapolada para kg ha^{-1} (Malavolta *et al.*, 1997).

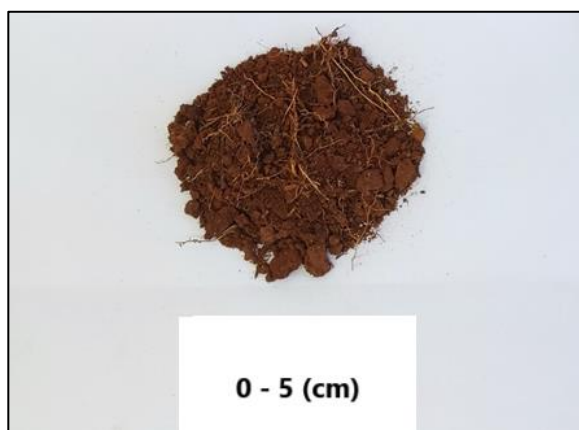


Figura 27: Amostra de solo contendo massa seca de raízes (profundidade 0 – 5 cm). Fonte: Autoria própria (2023)

As avaliações de matéria seca da parte aérea (MSPA) das culturas de cobertura foram realizadas em oito momentos: aos 0, 60, 105, 150, 180, 210, 240 e 270 dias após a roçagem mecânica. A primeira coleta (0 dias) correspondeu ao momento da roçagem mecânica, sendo utilizada como ponto inicial para estimar a quantidade de MSPA produzida até aquele estágio

(seguindo a altura de corte - 0,25 m) (figura 30). A segunda coleta, aos 60 dias, foi conduzida no período de senescência das culturas de cobertura, a fim de avaliar se houve incremento de biomassa em função da rebrota após a roçagem e a quantificar a quantidade de MSPA produzida pelos tratamentos que não foram manejados mecânicamente. As demais coletas (105 a 270 dias) foram realizadas para monitorar a dinâmica de decomposição da MSPA e liberação de nutrientes ao longo do tempo.



Figura 28: Coleta de MSPA no dia da roçagem mecânica (com altura de 0,25 m do solo) (A); coleta de MSPA aos 105 dias após a roçagem mecânica (B). Fonte: Autoria própria (2023)

As coletas foram conduzidas com base na metodologia adaptada de Crusciol *et al.* (2005), utilizando-se um quadrado de ferro com dimensões de 0,25 m × 0,25 m, aplicado aleatoriamente em dois pontos por parcela. Após a coleta, as amostras foram secas em estufa com circulação de ar forçado a 60 °C até atingirem massa constante, conforme descrito por Malavolta *et al.* (1997). Em seguida, foram pesadas e moídas em moinho com peneira de 2 mm, para posterior determinação da concentração dos nutrientes nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg).

A velocidade de liberação dos nutrientes a partir da dessecação das culturas de cobertura foi avaliada pelo modelo matemático exponencial decrescente propostos por Wieder e Lang (1982):

$$PL = Po \exp^{-kt}$$

em que:

PL = quantidade de nutrientes existentes no tempo t, em dias (kg ha^{-1});

Po = fração de nutrientes potencialmente liberados (kg ha^{-1});

k = constante de liberação de nutrientes (g g^{-1}).

O tempo de meia-vida ($T_{1/2}$ vida), proposto por Paul e Clark (1989) e que expressa o tempo para que metade dos nutrientes se decomponha, foi estimado por meio da equação: $T_{1/2}$ vida = $0,693/k$.

A produtividade de grãos da soja foi avaliada por meio de coletas em duas linhas de dois metros, expressos em kg ha^{-1} , corrigindo-se para 13% umidade.

11.4 Análise estatística

Os dados obtidos do experimento foram testados para normalidade (Shapiro-Wilk, Kolgomorov-Smirnov) com auxílio do software SISVAR 5.6 (Ferreira, 2019). Além disso, foi verificada a homoscedasticidade (Bartlett e Levene) com auxílio do software R Studio. Após, os resultados foram submetidos à análise de variância e, quando significativos, nos dados qualitativos foi realizado o teste LSD a 5% de probabilidade com auxílio do software SISVAR 5.6. Já os dados quantitativos, relacionados a velocidade de decomposição dos nutrientes, foram ajustados em equações, com auxílio do software SIGMA PLOT 10.0.

12 RESULTADOS

Os dados demonstraram efeito significativo no acúmulo de massa seca de raízes (MSR) na camada superficial do solo (0,00-0,05 m) quando as culturas de cobertura foram submetidas ao manejo mecânico por meio de roçagem (Figura 31). Destaca-se que o tratamento T4 apresentou a maior produção de MSR, totalizando 707,6 kg ha⁻¹, seguido pelo T2, com 596,5 kg ha⁻¹, porém não se diferem estatisticamente. Esses valores representam um aumento de 158% e 119%, respectivamente, em relação aos tratamentos que não receberam manejo mecânico, T1 e T3 (231,20 e 323,29 kg ha⁻¹). Porém, esse padrão não se repete ao longo do perfil solo, onde os tratamentos que foram roçados mecanicamente apresentaram uma redução na quantidade de raízes nas profundidades de 0.05-0.10, 0.10-0.20, 0.20-0.30 e 0.30-0.40 m.

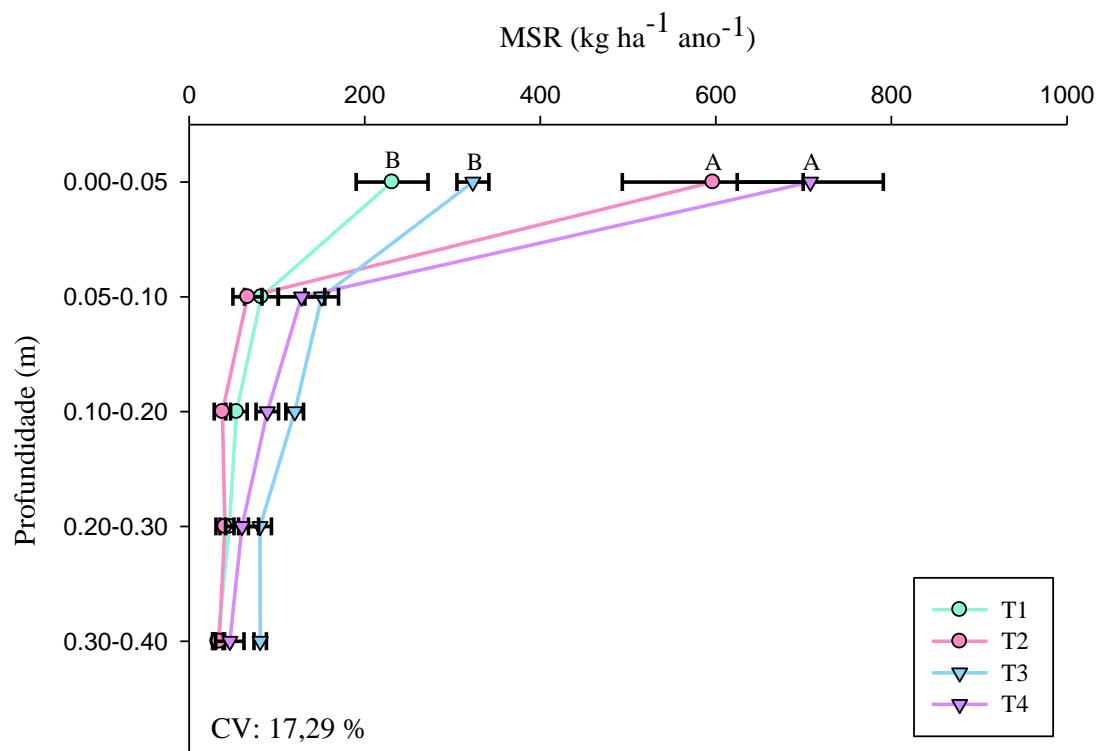


Figura 29: Massa seca de raízes (MSR) produzida por culturas de cobertura na segunda safra (média de dois anos). Médias seguidas de mesma letra, não diferem entre si pelo teste de LSD, a 5% de probabilidade. T1: *Crotalaria spectabilis* + *Pennisetum glaucum* + *U. ruziziensis* + *Cajanus cajan* – sem roçagem mecânica; T2: *Crotalaria spectabilis* + *Pennisetum glaucum* + *U. ruziziensis* + *Cajanus cajan* – com roçagem mecânica; Tratamentos: T3: *Urochloa ruziziensis* – sem a roçagem mecânica; T4: *Urochloa ruziziensis* – com a roçagem mecânica.

Quanto a massa seca da parte aérea (MSPA), os tratamentos que não receberam o manejo de corte mecânico apresentaram maior acúmulo de fitomassa em comparação com aqueles submetidos ao manejo (Figura 32). O tratamento T1 apresentou a maior produção de MSPA, totalizando 7.410,6 kg ha⁻¹, o que representa um incremento de 10% em relação ao T2, que produziu 6.759,0 kg ha⁻¹. O tratamento T3 obteve o terceiro maior aporte de MSPA, com 6.218,2 kg ha⁻¹, sendo 23% superior ao T4, que apresentou a menor produção, com 5.074,25 kg ha⁻¹.

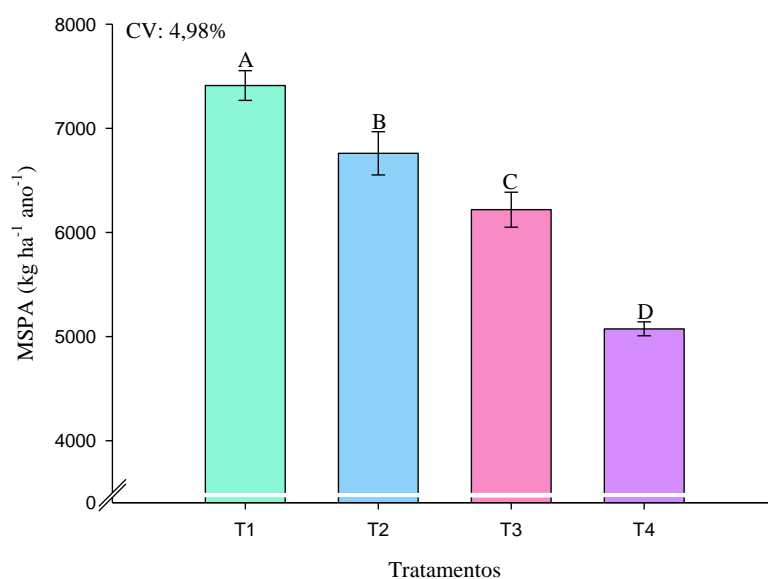


Figura 30: Acúmulo de massa seca da parte aérea (MSPA) por culturas anuais e de cobertura, durante a senescência das culturas, na segunda safra (média de dois anos). Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de LSD, a 5% de probabilidade. Tratamentos: T1: *Crotalaria spectabilis* + *Pennisetum glaucum* + *U. ruziziensis* + *Cajanus cajan* – sem roçagem mecânica; T2: *Crotalaria spectabilis* + *Pennisetum glaucum* + *U. ruziziensis* + *Cajanus cajan* – com roçagem mecânica; Tratamentos: T3: *Urochloa ruziziensis* – sem a roçagem mecânica; T4: *Urochloa ruziziensis* – com a roçagem mecânica.

Quanto ao acúmulo de nutrientes o tratamento T2 apresentou maior eficiência no acúmulo de todos os nutrientes avaliados (N: 94,6 kg ha⁻¹, P: 12,1 kg ha⁻¹, K: 171,5 kg ha⁻¹, Ca: 20,9 kg ha⁻¹, Mg: 21,0 kg ha⁻¹), seguido do T1 (Figura 33). Com relação ao T4, este demonstrou o menor acúmulo de nutrientes.

No que se refere a liberação dos nutrientes, observou-se que o tratamento T2 apresentou as maiores taxas de liberação com os menores tempo de meia vida ($T_{(1/2)}$) para todos os nutrientes avaliados (Figura 34). Quanto ao T4, apresentou os maiores $T_{(1/2)}$ exceto para o potássio (K) com 29 dias. Em relação ao cálcio acumulados pelas culturas de cobertura, este nutriente demonstrou os maiores $T_{(1/2)}$ em todos os tratamentos avaliados. A metade do teor de

N, P, K e Mg já tinham sido liberados para o solo durante a semeadura da soja, exceto para o Ca.

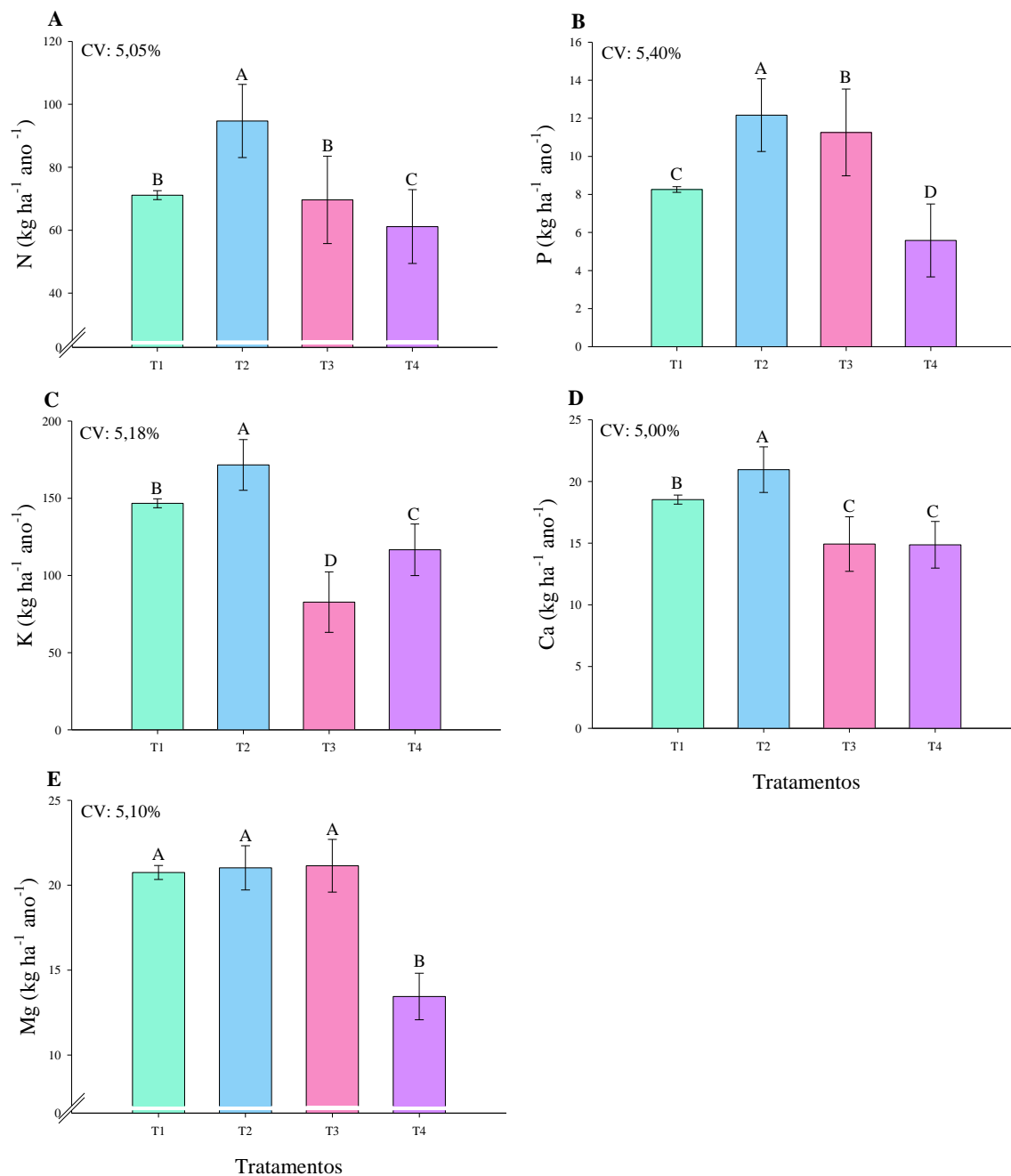


Figura 31: Acúmulo de N, P, K, Ca e Mg por culturas anuais e de cobertura, durante a senescência das culturas, na segunda safra durante (média de dois anos). Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de LSD, a 5% de probabilidade. T1: *Crotalaria spectabilis* + *Pennisetum glaucum* + *U. ruziziensis* + *Cajanus cajan* – sem roçagem mecânica; T2: *Crotalaria spectabilis* + *Pennisetum glaucum* + *U. ruziziensis* + *Cajanus cajan* – com roçagem mecânica; Tratamentos: T3: *Urochloa ruziziensis* – sem a roçagem mecânica; T4: *Urochloa ruziziensis* – com a roçagem mecânica.

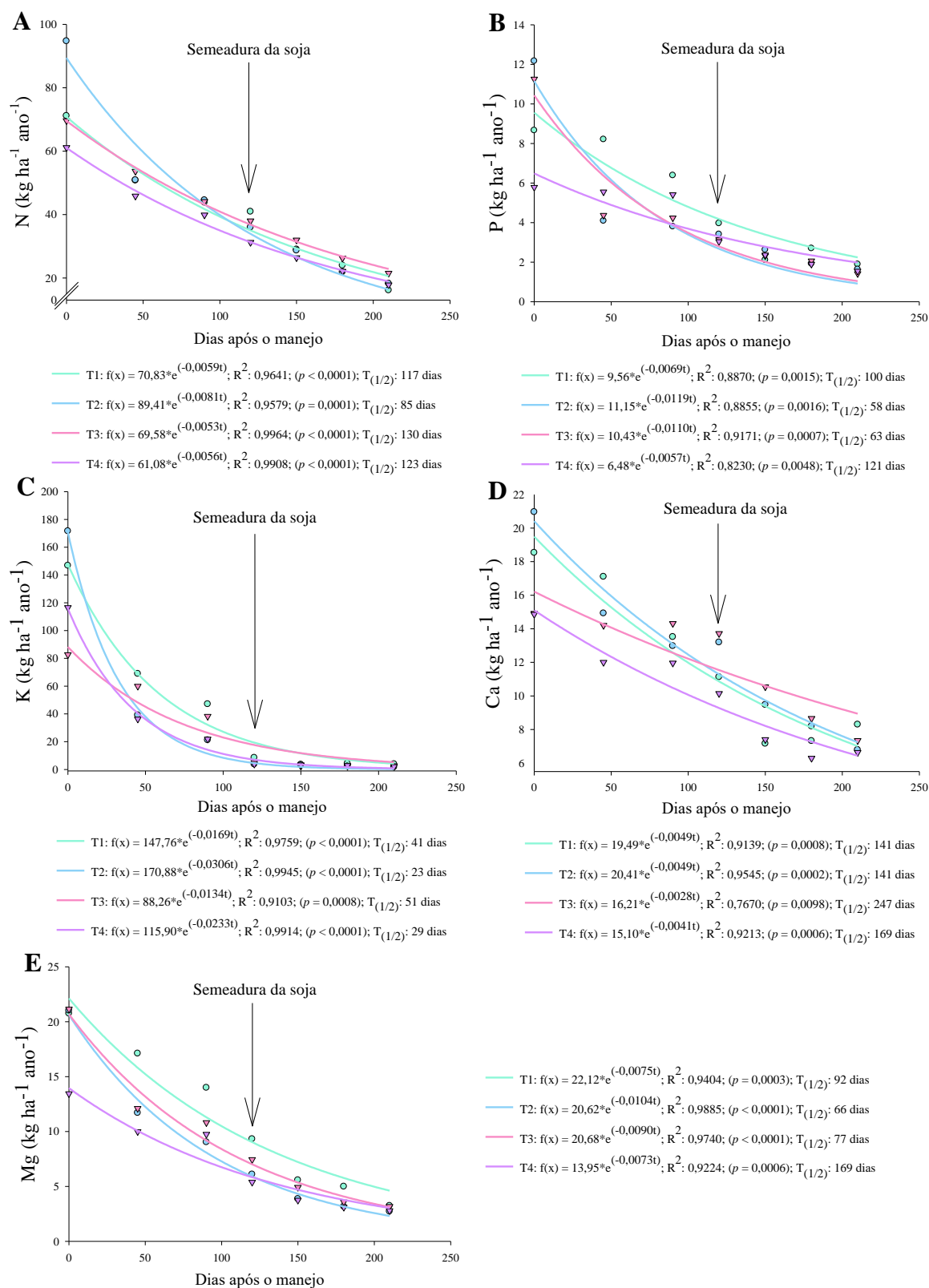


Figura 32: Acúmulo, liberação e tempo de meia vida ($T_{1/2}$) do N, P, K, Ca e Mg, proveniente das culturas anuais e de cobertura. T1: *Crotalaria spectabilis* + *Pennisetum glaucum* + *U. ruziziensis* + *Cajanus cajan* – sem roçagem mecânica; T2: *Crotalaria spectabilis* + *Pennisetum glaucum* + *U. ruziziensis* + *Cajanus cajan* – com roçagem mecânica; Tratamentos: T3: *Urochloa ruziziensis* – sem a roçagem mecânica; T4: *Urochloa ruziziensis* – com a roçagem mecânica.

Quanto a soja, a menor produtividade ocorreu no T3(3048,87 kg ha⁻¹) e os demais tratamentos não diferiram estatisticamente (Figura 35).

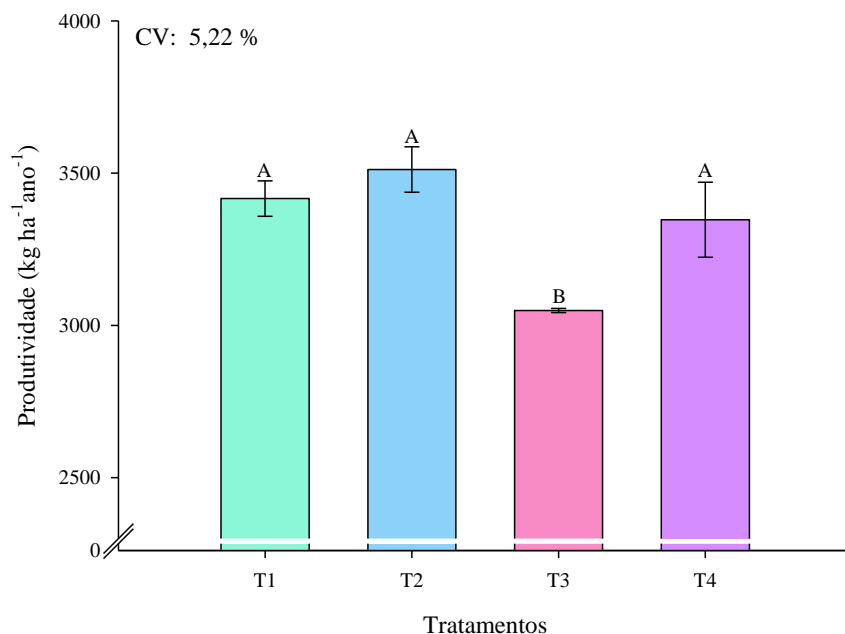


Figura 33: Produtividade da soja cultivada em sucessão as culturas anuais de cobertura, nas safras 2022/23 e 2023/24 (média de dois anos). Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de LSD, a 5% de probabilidade. T1: *Crotalaria spectabilis* + *Pennisetum glaucum* + *U. ruziziensis* + *Cajanus cajan* – sem roçagem mecânica; T2: *Crotalaria spectabilis* + *Pennisetum glaucum* + *U. ruziziensis* + *Cajanus cajan* – com roçagem mecânica; Tratamentos: T3: *Urochloa ruziziensis* – sem a roçagem mecânica; T4: *Urochloa ruziziensis* – com a roçagem mecânica.

13 DISCUSSÃO

13.1 Massa seca de raízes e parte aérea

A roçagem mecânica modificou a alocação de biomassa entre parte aérea e raízes das culturas de cobertura, influenciando a dinâmica de crescimento e a renovação dos tecidos vegetativos. Os dados evidenciam que a roçagem pode ser uma estratégia viável e sustentável para o manejo da cobertura vegetal em sistemas puros de plantio direto, especialmente como alternativa ao pastejo animal, frequentemente utilizado em sistemas integrados, seja em cultivo solteiro ou consorciado. Observou-se que esse manejo promoveu um estímulo fisiológico relevante, resultando na reorganização das prioridades metabólicas das plantas, especialmente das gramíneas, que redirecionaram recursos para o sistema radicular após o corte da parte aérea.

Esse redirecionamento foi evidente em ambos os tratamentos que foram manejados mecanicamente. O efeito no tratamento T4 (*U. ruziziensis* solteira), que apresentou o maior acúmulo de MSR na camada de 0–0,05 m, superando em 119% o mesmo cultivo sem roçagem (T3). No consórcio com roçagem (T2), o incremento de MSR foi ainda mais expressivo com 158% superior ao consórcio sem roçagem (T1), evidenciando que o estímulo mecânico atuou de forma sinérgica com a diversidade funcional, mesmo com baixa contribuição das leguminosas para a produção de MSR. Esse resultado confirma a elevada plasticidade das gramíneas tropicais, como *U. ruziziensis* e *P. glaucum*, cujo sistema radicular fasciculado e a capacidade de rebrota permitem rápida regeneração após o corte.

Esses valores representam um acréscimo expressivo em relação aos tratamentos sem manejo, reforçando a hipótese de que o corte da parte aérea pode atuar como estímulo fisiológico ao crescimento radicular em determinadas espécies. A elevada produção radicular no T4 é compatível com o comportamento observado por Redin (2014) e Roumet *et al.* (2008), que verificou que as gramíneas da família Poaceae apresentaram, em média, entre 1,5 e 1,8 vezes mais produção de raízes do que leguminosas, sendo mais eficientes na alocação de biomassa no sistema radicular.

Ficou claro que as duas gramíneas (*U. ruziziensis* e *P. glaucum*), foram determinantes para a rebrota e a produção de novas raízes após a roçagem mecânica em (T2). Essa capacidade está associada à presença de gemas basais localizadas na região do colmo próxima ao solo, protegidas por bainhas foliares e próximas às reservas de carboidratos (Rodrigues *et al.*, 2007). Após o corte da parte aérea, essas gemas foram ativadas, emitindo novos perfilhos e estimulando a expansão radicular. Além disso, a arquitetura radicular fasciculada típica das

Poaceae, combinada com a alta performance fisiológica dessas espécies, favoreceu a elevada MSR na camadas superficial do solo.

E ao estimular a rebrota e prolongar a atividade fotossintética das plantas, elevou a assimilação de carbono e a disponibilidade de fotoassimilados (Carvalho *et al.*, 2001) para o sistema radicular. Esse efeito está associado à redução da dominância apical por meio da roçagem e à ativação das gemas basais (Rodrigues *et al.*, 2007), favorecendo a emissão de novos perfilhos e raízes. Além disso, a reorganização das prioridades metabólicas das plantas após o corte priorizou a regeneração radicular.

A análise dos dados de MSPA evidencia essa priorização do crescimento radicular, uma vez que os tratamentos não submetidos à roçagem apresentaram maior acúmulo de biomassa aérea. Esse padrão pode ter sido intensificado pelas condições de baixa precipitação registradas após o corte (Figura 23), as quais possivelmente limitaram a recuperação da parte aérea, reforçando o direcionamento de recursos para o sistema radicular. O T1 apresentou o maior acúmulo de MSPA, favorecido pela presença de *P. glaucum* e *U. ruziziensis*, espécies reconhecidas pela elevada capacidade de produção de biomassa. A combinação de espécies com diferentes ciclos fenológicos e arquiteturas de crescimento promoveu aporte contínuo de MSPA (Carvalho *et al.*, 2021), maximizando o uso de luz, água e nutrientes, como também evidenciado nas imagens do apêndice A (Figuras A1, A2 e A3). Dalla Còrt *et al.* (2025) demonstrou que sistemas com maior diversidade florística, com um MIX espécies, promove maior acúmulo de MSPA.

Por outro lado, a produção de MSPA nos tratamentos T3 e T4, ambos com *U. ruziziensis* solteira, foi inferior aos consórcios, sendo que T4 (com roçagem) o tratamento de menor desempenho. Assim como no T2, a *U. ruziziensis* priorizou a produção de MSR. Segundo Gomide *et al.* (2002), a remoção da parte aérea, representa um estresse para as plantas. Com a realização da roçagem mecânica, a planta respondeu ao corte, redirecionando as reservas energéticas para o crescimento radicular, o que levou ao atraso da sua recuperação e limitando o crescimento de novos tecidos da parte aérea, até o período de dessecação das culturas de cobertura. Em contraste, estudos feito por Difante *et al.* (2011) demonstram que o corte feito a 30 cm usando a *Urochloa brizantha* cv. Marandu, quando combinada com intervalos longos, proporcionou elevado acúmulo de forragem total (até 8.000 kg ha⁻¹), mas com maior proporção de colmos e material senescente.

Assim, a menor produção observada nos tratamentos roçados não indica necessariamente uma perda na produção de MSPA, mas sim um redirecionamento temporário das funções fisiológicas da planta (Vilela *et al.*, 2011; Moraes *et al.*, 2014), priorizando o

sistema radicular e após a regeneração a estabilidade do dossel pode ocorrer ao longo do tempo.

13.2 Acúmulo e liberação de nutrientes por meio das culturas de cobertura

O acúmulo de nutrientes na massa seca da parte aérea (MSPA) das culturas de cobertura variou significativamente entre os tratamentos, com destaque para o consórcio submetido à roçagem mecânica (T2), que apresentou os maiores valores para todos os nutrientes avaliados (N, P, K, e Ca). A roçagem promoveu estímulos fisiológicos que resultaram na rebrota e no desenvolvimento de novos tecidos, elevando a capacidade de absorção de nutrientes. O maior acúmulo de nitrogênio observado em T2 e T1 está relacionado à presença de leguminosas fixadoras de N atmosférico, como *Crotalaria spectabilis* e *Cajanus cajan*, que também contribuem com resíduos ricos em nitrogênio (Vilela *et al.*, 2011; Moraes *et al.*, 2014).

Em relação ao fósforo, o tratamento T2 obteve o maior acúmulo, atribuído não apenas à roçagem, mas principalmente à diversidade de espécies no consórcio. A presença de *U. ruziziensis* no consórcio, por exemplo, contribui com a exsudação de ácidos orgânicos como oxálico, cítrico e málico, capazes de solubilizar formas pouco lábeis de fósforo, enquanto o *P. glaucum* e as leguminosas complementam essa ação com raízes exploradoras e estímulo à microbiota rizosférica (Bilhar Araújo *et al.*, 2024). A combinação dessas culturas de cobertura permite um ambiente biológico mais ativo, capaz de mobilizar o P presente na matéria orgânica ou retido em complexos com ferro, alumínio e cálcio (Almeida *et al.*, 2020). Em contraste, o tratamento T4 (monocultivo de *U. ruziziensis* roçado) teve o menor acúmulo de P, evidenciando que a diversidade funcional é essencial para maximizar a ciclagem desse nutriente.

Os mesmos padrões foram observados para K, Ca e Mg, em que o consórcio manejado mecânicamente se destacou no acúmulo destes nutrientes. No estudo de Davi *et al.* (2023), os autores demonstram que aumentos na diversidade funcional de culturas de cobertura estão diretamente relacionados ao maior acúmulo de nutrientes na fitomassa. Essa relação é explicada pela complementaridade entre as espécies, onde diferentes morfologias radiculares, estratégias de absorção e interações com a microbiota do solo promovem uma exploração mais eficiente dos nutrientes disponíveis (Silva *et al.*, 2021; Timm *et al.*, 2024). A roçagem, quando aplicada a sistemas com maior diversidade, potencializou a absorção destes nutrientes em maior quantidade, favorecendo a eficiência na ciclagem de nutrientes, refletindo as interações sinérgicas entre as espécies e os microrganismos do solo.

A dinâmica de liberação de nutrientes também foi influenciada pelo manejo e

composição das culturas. O tratamento T2 apresentou os menores tempos de meia-vida para os nutrientes avaliados, N apresentou o tempo de meia vida de 85 dias, suficiente para permitir que boa parte do N estivesse disponível no solo durante os estágios iniciais da soja, favorecendo sua nutrição. Esse padrão foi semelhante para o P (58 dias), Ca (141 dias) e Mg (66 dias), indicando liberação mais rápida e sincronizada com as necessidades iniciais da soja. Já o tratamento T1, sem roçagem, teve liberação mais lenta devido à maior proporção de tecidos lignificados, favorecendo a liberação prolongada e proteção contra perdas por lixiviação. O potássio, devido à sua forma solúvel no citoplasma vegetal, atuando como íon livre (K^+) (Bazzo *et al.*, 2021), foi liberado rapidamente em todos os tratamentos, com o maior tempo de meia vida com 51 dias para o T3. Corroborando com São Miguel *et al.* (2021) em demonstrou que o P é rapidamente liberado ao solo, com tempos de meia-vida entre 12 e 62 dias.

13.3 Produtividade da soja

Os resultados de produtividade da soja revelaram que a combinação entre a diversificação de culturas de cobertura e o manejo por roçagem mecânica (T2) foi decisiva para o melhor desempenho da cultura em sucessão (Figura 14). Esse tratamento promoveu os maiores rendimentos de grãos, evidenciando que a interação entre diversidade funcional das espécies e a prática da roçagem exerce efeitos sinérgicos no sistema. Esse desempenho superior pode ser atribuído, principalmente, ao elevado acúmulo de nutrientes na MSPA (N, P, K, Ca e Mg) e à sua liberação sincronizada com a demanda nutricional da soja, favorecendo sua absorção nos estágios críticos de desenvolvimento.

Embora o tratamento T1 tenha apresentado maior acúmulo de MSPA em comparação ao T2, os dois tratamentos resultaram em produtividades semelhantes da soja em sucessão, o que indica que fatores além da quantidade de palhada influenciaram o desempenho da cultura. No T2, a roçagem mecânica promoveu a rebrota das espécies de cobertura, o que resultou em incremento de 158% na MSR em relação ao T1. Esse maior desenvolvimento do sistema radicular pode ter contribuído para o acúmulo de matéria orgânica no solo, amplificando a atividade microbiana e melhorando atributos físicos importantes, como a estrutura e a porosidade do solo (Nardi *et al.*, 2021; Silva, 2023). Balbinot Jr. *et al.* (2017) evidenciaram que a produção de raízes apresentam elevado impacto na produtividade da soja, promovendo ganhos de até 55% no rendimento de grãos.

Além disso, o T2 também se destacou pelo acúmulo mais eficiente de nutrientes e por

sua liberação sincronizada com as fases de maior exigência nutricional da soja, como demonstrado pelos menores tempos de meia-vida ($T_{1/2}$) dos nutrientes, em comparação aos demais tratamentos (Figura 33). Esse padrão evidencia que, embora T1 tenha produzido mais MSPA, o T2 foi mais eficaz na ciclagem e na disponibilidade de nutrientes para a cultura sucessora. Adicionalmente, os resultados obtidos por Dalla Côt *et al.* (2021) reforçam que consórcios de culturas de cobertura são mais eficientes no aproveitamento de nutrientes, favorecendo a cultura da soja cultivada em sucessão por meio da ciclagem de nutrientes, o que pode ser observado em ambos tratamentos T1 e T2.

Ainda, é importante destacar que, embora o tratamento T4 tenha sido composto por uma única espécie, a *U. ruziziensis*, a aplicação da roçagem favoreceu a rebrota do sistema radicular, resultando em produtividade similar aos consórcios. Isso mostra que, mesmo em sistemas com baixa diversidade, o manejo adequado pode compensar parcialmente a ausência de complementaridade entre espécies e ciclagem de nutrientes, desde que a espécie utilizada tenha alta capacidade de rebrote e produção radicular, como é o caso da *U. ruziziensis*. Além disso, o manejo com roçagem mecânica seguida da dessecação das culturas de cobertura promove uma deposição escalonada de fitomassa sobre o solo, o que intensifica os processos de ciclagem de nutrientes e a adição de matéria orgânica (Raij, 2011; Fageria, 2012).

Por outro lado, o tratamento T3 (braquiária sem roçagem) apresentou limitações importantes, sobretudo em relação à ciclagem de potássio. Apesar de ter acumulado quantidades similares de N, P, Ca e Mg em comparação ao T4, a menor deposição de potássio comprometeu sua eficiência. Este macronutriente é essencial para a soja, especialmente durante o estabelecimento da cultura, devido ao seu papel na regulação osmótica, no transporte de fotoassimilados e na tolerância ao estresse hídrico (Taiz e Zeiger, 2004; Silva *et al.*, 2021). A ausência de manejo por roçagem, somada ao menor acúmulo de K, pode ter afetado negativamente a produtividade da soja. Esse conjunto de fatores justifica o menor desempenho produtivo observado no T3, reforçando a importância do manejo mecânico e da diversidade para a sustentabilidade dos sistemas. A combinação entre diversidade funcional e manejo adequado potencializa os serviços ecossistêmicos das culturas de cobertura e contribui para a sustentabilidade e resiliência dos sistemas agrícolas.

14 CONCLUSÃO

1. A aplicação da roçagem mecânica teve efeito positivo sobre a produção de massa seca radicular com aumento de 158% no consórcio e 119% com a *Urochloa ruziziensis*, evidenciando que a remoção parcial da parte aérea estimula a rebrota das raízes superficiais.
2. Os tratamentos compostos pelos consórcios de culturas de cobertura apresentaram os maiores acúmulos de massa seca da parte aérea, mesmo o tratamento submetido a roçagem mecânica, reforçando o papel da diversidade vegetal na produção contínua de fitomassa.
3. O consórcio entre *Crotalaria spectabilis*, *Pennisetum glaucum*, *Urochloa ruziziensis* e *Cajanus cajan* submetido a roçagem mecânica, evidenciam maior ciclagem de nutrientes (acima de 50%), resultado da interação e rebrota entre as espécies, em que ampliou a exploração do perfil do solo e aumentou a eficiência na absorção de nutrientes.
4. A diversidade de espécies e a roçagem mecânica, mostrou-se especialmente benéfica, refletindo diretamente no aumento (acima de 150%) da produtividade da soja cultivada em sucessão.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, D. S.; DELAI, L. B.; SAWAYA, A. C. H. F.; ROSOLEM, C. A. Exudation of organic acid anions by tropical grasses in response to low phosphorus availability. **Nature - Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 1-12, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-73398-1>.
- ALMEIDA, R. C. D.; CUNHA FILHO, M.; LEITE, O. D. C.; FERNANDES, M. M.; ARAÚJO FILHO, R. N. D. Impact of land use change on nitrogen stocks in plinthosols of cerrado. **Revista Caatinga**, v. 37, p. e12299, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-21252024v3712299rc>.
- ALVES, C. P.; JÚNIOR, B. C.; ROCHA, A. K. P.; DE MENEZES VIEIRA, D. S. M.; DA SILVA EUGÊNIO, D.; LEITE, M. L. D. M. V. Respostas morfofisiológicas das plantas forrageiras sob manejo de cultivo e pastejo: Uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 6, p. e10610615405-e10610615405, 2021. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i6.15405>
- BALBINOT JUNIOR, A. A.; FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; YOKOYAMA, A. H. Contribuição de raízes e parte aérea de espécies de braquiárias no desempenho da soja em sucessão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.52, n.8, p.592-598, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2017000800004>
- BALBINOT, A. A.; SANTOS, J. C. F. D.; DEBIASI, H.; COELHO, A. E.; SAPUCAY, M. J. L. D. C.; BRATTI, F.; LOCATELLI, J. L. Performance of soybean grown in succession to black oat and wheat. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 55, p. e01654, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2020.v55.01654>
- BALDOCK, J. A.; NELSON, P. N. **Soil Organic Matter**. In: SUMNER, M.E. (ed.) *Handbook of Soil Science*. Boca Raton: CRC Press, 2000. B25-B84.
- BAZZO, J. H. B.; SANTOS, A. do C.; MARINHO, J. de L. Doses de potássio e boro em cobertura no desempenho produtivo da soja. **Agrarian**, v. 14, n. 54, 404–411, 2021. DOI: <https://doi.org/10.30612/agrarian.v14i54.15183>
- BEUTLER, A. N.; FONSECA, D. A. R.; FULANETI, F. S.; BRANDLI, L. W.; ZIMMERMANN, P.; SCHEFFER, N. M. Quantidade de palha de azevém na superfície do solo e produtividade de soja em plantio direto sob integração lavoura-pecuária. **Observatório de la Economía Latinoamericana**, v. 22, n. 1, p. 01-15, 2024. DOI: <https://doi.org/10.55905/oelv22n1-001>.
- BILHAR ARAÚJO, E. V.; MAJOLO, C.; GOMES DE LIMA, I.; PINHEIRO DOS SANTOS, J.; WESTPHAL MUNIZ, A. Solubilização de fosfatos e potássio por bactérias rizosféricas-uma revisão. **Nativa**, v. 12, n. 4, 2024. DOI: <https://doi.org/10.31413/nat.v12i4.17576>
- BORENSTEIN, M.; HEDGES, L. V.; HIGGINS, J. P. T.; ROTHSTEIN, H. R. **Introduction to Meta-analysis**. United Kingdom: Wiley & Sons Ltd, 2021. 421 p.
- CARDOSO, K. A. K.; IWAMOTO, E. L. I.; SERT, M. A.; REIGOSA, M. J.; MOREIRA, A. M. S. Inibição do crescimento e alterações na ultraestrutura das raízes de *Arabidopsis thaliana*

(L.) Heynh tratadas com o extrato aquoso da palhada de *Brachiaria ruziziensis* R. Germ & CM Evrard e com o ácido trans-aconítico. **Cuadernos de Educación y Desarrollo**, v. 16, n. 13, p. e6747-e6747, 2024. <https://doi.org/10.55905/cuadv16n13-022>

CARVALHO, A. M.; RIBEIRO, L. R. P.; MARCHÃO, R. L.; OLIVEIRA, A. D.; PULROLNIK, K.; FIGUEIREDO, C. C. Chemical composition of cover crops and soil organic matter pools in no-tillage systems in the Cerrado. **Soil Use and Management**, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1111/sum.12746>.

CARVALHO, C. A. B. D.; SILVA, S. C. D.; SBRISSIA, A. F.; FAGUNDES, J. L.; CARNEVALLI, R. A.; PINTO, L. F. D. M.; PEDREIRA, C. G. S. Carboidratos não estruturais e acúmulo de forragem em pastagens de *Cynodon* spp. sob lotação contínua. **Scientia Agricola**, v. 58, p. 667-674, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162001000400003>

CHAVEIRO, A. C.; BONINI, C. DOS S. B.; FREITAS, P. G. N.; REIS, D. C. DE S.; OLIVEIRA, J. M. K. DE; SOUZA, J. A. L. DE; HIDALGO, G. F.; OLIVEIRA, A. B. DE. Qualidade física e química do solo em sistema de plantio direto cultivado com hortaliças – Uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 9, p. e32711931564, 2022. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i9.31564>.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**, Brasília, DF, v. 12, safra 2024/25, n. 5 levantamento, fevereiro 2025. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos> > Acesso em: 11 de março de 2025.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**, Brasília, DF, v. 12, safra 2023/24, n. 12 levantamento, setembro 2024. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos> > Acesso em: 11 de março de 2025.

CONCEIÇÃO, P. C.; AMADO, T. J. C.; MIELNICZUK, J. SPAGNOLLO, E. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 29, p. 777-788, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832005000500013>

CÔRT, A. S. D.; PACHECO, L. P.; GUEDES, T. R. M.; SILVA, L. S.; GRECO, T. M.; DE MACEDO, K. S.; CRUSCIOL, C. A. C. Crop rotation with Species Diversification During Off-season Impact the Nutrient Cycling in No-tillage System. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 25, p. 5427–5438, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42729-025-02475-z>

CRUSCIOL, C. A. C.; COTTICA, R. L.; LIMA, E. do V.; ANDREOTTI, M.; MORO, E.; MARCON, E. Persistência de palhada e liberação de nutrientes do nabo forrageiro no plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, p. 161-168, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2005000200009>

CUNHA, F. F.; RAMOS, M. M.; ALENCAR, C. A. B.; MARTINS, C. E.; CÓSER, A. C.; OLIVEIRA, R. A. Sistema radicular de seis gramíneas irrigadas em diferentes adubações nitrogenadas e manejos. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 32, n. 2, p. 351-357, 2010. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v32i2.1020>

CUTRIM JUNIOR, J. A. A.; CÂNDIDO, M. J. D.; VALENTE, B. S. M.; CARNEIRO, M. S. D. S.; CARNEIRO, H. A. V. Características estruturais do dossel de capim-tanzânia submetido a três frequências de desfolhação e dois resíduos pós-pastejo. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 40, p. 489-497, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-35982011000300005>

DALLA CÔRT, A. S.; FEITOSA, P. B.; PACHECO, L. P.; GRECO, T. M.; SILVA, I. D. F.; SOUZA, E. D.; CRUSCIOL, C. A. C. Accumulation and efficiency in the nutrients use by production systems in second season under no-tillage. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 56, p. 01879, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2021.v56.01879>.

DE FREITAS, A. C. R.; SOUZA, G. da S.; GOMES, E. G.; COSTA, F. de S.; KLEPKER, D. Performance of low carbon intensified agriculture farm in the Brazilian Savanna by means of univariate and multivariate approaches. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 52, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-40632022v5272425>.

DE SOUSA, D. C.; MEDEIROS, J. C.; LACERDA, J. D. J.; ROSA, J. D.; BOECHAT, C. L.; DE SOUSA, M. D. N. G.; MAFRA, Á. L. Dry mass accumulation, nutrients and decomposition of cover plants. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, n. 5, p. 152-160, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5539/jas.v11n5p152>

DENARDIN, L. G. D. O.; MORAES, J. M.; TAVARES, D. S.; PIRES, G. C.; SILVA, L. S.; PACHECO, L. P.; SOUZA, E. D. Mixed grass–legume pastures in integrated crop-livestock systems: A strategy to improve soil health and soybean yield in the Brazilian Cerrado. **Plant and Soil**, p. 1-16, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-025-07307-8>.

DIFANTE, G. D. S.; NASCIMENTO JÚNIOR, D. D.; SILVA, S. C. D.; EUCLIDES, V. P. B.; MONTAGNER, D. B.; SILVEIRA, M. C. T. D.; PENA, K. D. S. Características morfológicas e estruturais do capim-marandu submetido a combinações de alturas e intervalos de corte. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 40, p. 955-963, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-35982011000500003>

FAGERIA, N. K. Role of soil organic matter in maintaining sustainability of cropping systems. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 43, p. 2063-2113, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103624.2012.697234>

FERREIRA, D. F. SISVAR: Um sistema computacional de análise para delineamento de parcelas subdivididas de efeitos fixos. **Revista Brasileira de Biometria**, v. 37, n. 4, p. 529–535, 2019. DOI: <https://doi.org/10.28951/rbb.v37i4.450>

FERREIRA, E. P. B.; STONE, L. F.; MARTIN-DIDONET, C. C. G. População e atividade microbiana do solo em sistema agroecológico de produção. **Revista Ciência Agronômica**, v. 48, n. 1, p. 22-31, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20170003>.

GARBA, I. I.; BELL, L. W.; WILLIAMS, A. Cover crop legacy impacts on soil water and nitrogen dynamics, and on subsequent crop yields in drylands: a meta-analysis. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 42, n. 3, p. 34, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00760-0>.

GARLAND, G.; BÜNEMANN, E. K.; OBERSON, A.; FROSSARD, E.; SIX, J. Plant-mediated rhizospheric interactions in maize-pigeon pea intercropping enhance soil aggregation and organic phosphorus storage. **Plant and Soil**, v. 415, n. 1, p. 37-55, 2017.

DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-016-3145-1>

GAZZONI, D. L.; DALL'AGNOL, A. **A saga da soja: de 1050 a.C a 2050 d.C**. 1. ed., Brasília, DF: Embrapa, 2018. p. 23.

GOMIDE, C. A. D. M.; GOMIDE, J. A.; MARTINEZ Y HUAMAN, C. A.; PACIULLO, D. S. C. Photosynthesis, organic reserves and regrowth of mombaçagrass (*Panicum maximum* Jacq.) under different defoliation intensities of the main tiller. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 31, p. 2165-2175, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-35982002000900003>

GUIDUCCI, R. D. C. N.; HIRAKURI, M. H. Sistemas de produção de grãos e risco econômico em áreas consolidadas e de expansão agrícola no Brasil. **Revista de Economia e Agronegócio**, v. 18, n. 3, p. 1-24, 2020. DOI: <https://doi.org/10.25070/rea.v18i3.9661>

HAILE, S. G.; NAIR, P. K. R.; NAIR, V. D. Carbon storage of different soil-size fractions in Florida silvopastoral systems. **Journal of Environmental Quality**, v. 37, p. 1789-1797, 2008. DOI: <https://doi.org/10.2134/jeq2007.0509>

JINDO, K.; OLIVARES, F. L.; MALCHER, D. J. P.; SÁNCHEZ-MONEDERO, M. A.; KEMPENAAR, C.; CANELLAS, L. P. From lab to field: role of humic substances under open-field and greenhouse conditions as biostimulant and biocontrol agent. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, 426, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00426>.

LAMAS, F. M. **Culturas de outono/inverno**. Embrapa Agropecuária Oeste, 2024.

LARKIN, R.P. Effects of different cover crops and amendments on soil and crop properties in organic vegetable production. **Agronomy**. V. 14, n. 1, 171, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy14010171>

MADDEN, L. V.; PAUL, P. A. Meta-analysis for evidence synthesis in plant pathology: an overview. *Phytopathology*, v. 101, p. 16-30, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1094/PHYTO-03-10-0069>

MAIA, S. M. F.; XAVIER, F. A. S.; OLIVEIRA, T. S.; MENDONÇA, E. S.; ARAÚJO FILHO, J. A. Organic carbon pools in a Luvisol under agroforestry and conventional farming systems in the semi-arid region of Ceará, Brazil. **Agroforestry Systems**, v. 71, n. 2, p. 127-138, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-007-9063-8>

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: Potafos, 1997. 319 p

MORAES, A. de; CARVALHO, P. C. de F.; LUSTOSA, S. B. C.; LANG, C. R.; DEISS, L. Research on integrated crop-livestock systems in Brazil. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, p. 1024-1031, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1806-66902014000500018>.

NARDI, S.; SCHIAVON, M.; FRANCIOSO, O. Chemical structure and biological activity of humic substances define their role as plant growth promoters. **Molecules**, v. 26, 2256, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules26082256>.

NERY, J. S.; JUNIOR, K. S. F. Plantas de cobertura como estratégia de melhoria da fertilidade do solo. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 10, p. e36121043363-

e36121043363, 2023. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v12i10.43363>

OLIVEIRA, P. de; KLUTHCOUSKI, J.; FAVARIN, J. L.; SANTOS, D. de C. Consórcio de milho com braquiária e guandu-anão em sistema de dessecação parcial. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 10, p. 1184-1192, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000010>

OPOKU, A.; OGUNLEYE, A. M.; SOLOMON, J. K.; PAYNE, W. A. Cover crop systems impact on biomass production, carbon-to-nitrogen ratio, forage quality, and soil health in a semi-arid environment. **Heliyon**, v. 10, n. 20, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39600>

OZÓRIO, J. M. B.; ROSSET, J. S.; CARVALHO, L. A. D.; GONÇALVES, A. D. S.; SANTOS, W. V. D.; OLIVEIRA, N. D. S.; PANACHUKI, E. Effects of different agricultural systems on organic matter and aggregation of a medium-textured soil in subtropical region. **Revista Ambiente & Água**, v. 19, p. e2952, 2024. DOI: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2952>.

PACHECO, L. P.; DE SOUSA MONTEIRO, M. M.; PETTER, F. A.; NÓBREGA, J. C. A.; DOS SANTOS, A. S. Produção de fitomassa e ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura no cerrado piauiense. **Revista Caatinga**, v. 30, n. 1, p. 13-23, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-21252017v30n102rc>

PACHECO, L. P.; FONSECA, W. L.; MENEZES, C. C. E.; LEANDRO, W. M.; ASSIS, R. L.; PETTER, F. A. Phytomass production and micronutrient cycling by cover crops in the Brazilian cerrado of Goiás. **Comunicata Scientiae**, v. 9, p. 12-18, 2018. DOI: <https://doi.org/10.14295/cs.v9i1.1094>

PACHECO, L. P.; LEANDRO, W. M.; MACHADO, P. L. O. de A.; ASSIS, R. L. de; COBUCCI, T.; MADARI, B. E.; PETTER, F. A. Produção de fitomassa e acúmulo e liberação de nutrientes por plantas de cobertura na safrinha. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, p. 17-25, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011000100003>.

PACHECO, L. P.; MIGUEL, A. S. D. C. S.; BONFIM-SILVA, E. M.; SOUZA, E. D. D.; SILVA, F. D. D. Influência da densidade do solo em atributos da parte aérea e sistema radicular de crotalária. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 45, p. 464-472, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-40632015v4538107>

PAUL, E. A.; CLARK, F. E. **Soil microbiology and chemistry**. San Diego: 1989. 275 p.

PAULO, J.; BARARI, M. Meta-análise e revisões sistemáticas tradicionais da literatura: O quê, por que, quando, onde e como?. **Psicologia e Marketing**, v. 39, n. 6, p. 1099-1115, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/mar.21657>.

PINTO, L. A. S. R.; LIMA, S. S.; SILVA, C. F.; GONÇALVES, R. G. M.; MORAIS, I. S.; FERREIRA, R. Soil quality indicators in conventional and conservation tillage systems in the Brazilian Cerrado. **Environmental Earth Sciences**, v. 81, n. 11, p. 1-13, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10426-5>.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: IPNI, 2011. 420 p.

RAIMAM, M. P.; DA SILVA, L. L. A complexa e dinâmica rede de respostas químicas na

rizosfera. *In* Ciências Agrárias: Limites e potencialidades em pesquisa - volume 2 (Vol. 2, pp. 12-28). Editora Científica Digital, 2023. DOI: <https://doi.org/10.37885/230613535>

REDIN, M. **Produção de biomassa, composição química e decomposição de resíduos culturais da parte aérea e raízes no solo**. 114f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Santa Maria, 2014.

REDIN, M.; GIACOMINI, S. J.; FERREIRA, P. A. A.; ECKHARDT, D. P. **Plantas de cobertura de solo e agricultura sustentável: espécies, matéria seca e ciclagem de carbono e nitrogênio**. Práticas alternativas de manejo visando a conservação do solo e da água, p. 7-22, 2016.

ROUMET C, LAFONT F, SARI M, WAREMBOURG F, GARNIER E. Root traits and taxonomic affiliation of nine herbaceous species grown in glasshouse conditions. **Plant Soil**, v. 312, p. 69-83, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9635-z>

SANTOS, G. A. dos; SILVA, L. S. da; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. de O. Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais. *In*: SANTOS, G. A. dos *et al.* **Matéria orgânica e a fertilidade do solo**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2023. cap. 2, p. 25–45

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. DOS; OLIVEIRA, V. A. DE; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. C.; ALMEIDA, J. A. DE; ARAÚJO FILHO, J. C. DE; OLIVEIRA, J. B. DE; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed., rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.

SCAVAZZA, A. L.; SOARES, M. R.; CASAGRANDE, J. C.; MEDEIROS, S. D. S. de; SANTI, P. H. P. de. Produção de fitomassa e extração de macronutrientes por plantas de cobertura cultivadas na estação seca. **Nativa**, v. 6, n. 6, p. 619–624, 2018. DOI: <https://doi.org/10.31413/nativa.v6i6.5609>.

SILVA, M. A.; NASCENTE, A. S.; FRASCA, L. L. D. M.; LANNA, A. C.; LACERDA, M. C.; SILVA, C. B. D. Biomass, nutrient accumulation, and weed suppression by mix of cover crops. **Revista Caatinga**, v. 36, n. 4, p. 757-764, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-21252023v36n403rc>

SILVA, M. A.; NASCENTE, A. S.; FRASCA, L. L. de M.; REZENDE, C. C.; FERREIRA, E. A. S.; FILIPPI, M. C. C. de; LANNA, A. C.; FERREIRA, E. P. de B.; LACERDA, M. C. Isolated and mixed cover crops to improve soil quality and commercial crops in the Cerrado. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 12, p. e11101220008, 2021. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i12.20008>.

SILVA, M. A.; STEPHAN NASCENTE, A.; LANNA, A. C.; REZENDE, C. C.; CRUZ, D. R. C.; FRASCA, L. L. de M.; FERREIRA, A. L.; FERREIRA, I. V. L.; DUARTE, J. R. de M.; FILIPPI, M. C. C. de. Direct tillage system and crop rotation in the Cerrado. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 13, p. e376111335568, 2022. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i13.35568>.

SILVA, S. C.; NASCIMENTO JÚNIOR, D. Avanços na pesquisa com plantas forrageiras tropicais em pastagens: características morfofisiológicas e manejo do pastejo. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 36, p. 122-138, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-35982007001000014>

SIMON, C. D. P.; GOMES, T. F.; PESSOA, T. N.; SOLTANGHEISI, A.; BIELUCZYK, W.; CAMARGO, P. B. D. Soil quality literature in Brazil: A systematic review. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 46, 2022. DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20210103>.

SOMENAHALLY, A.; MCLAWRENCE, J.; DUPONT, J. I.; BRADY, J.; SARKAR, R.; ROUQUETTE, M. Root-mycorrhizae interactions contributed to organic carbon density in the sandy soil profiles of adapted grazing lands. *Applied Soil Ecology*, v. 154, p. 103656, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103656>.

SOUSA, B. M. L.; NASCIMENTO JUNIOR, D.; RODRIGUES, C. S.; MONTEIRO, H. C. de F.; SILVA, S. C. da; FONSECA, D. M. da; SBRISSIA, A. F. Características morfogênicas e estruturais do capim-Xaraés submetidos a alturas de corte. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 40, n. 1, p. 53-59, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-35982011000100008>

SOUSA, D. C. DE; MEDEIROS, J. C.; LACERDA, J. J. DE J.; ROSA, J. D.; BOECHAT, C. L.; SOUSA, M. DE N. G. DE; RODRIGUES, P. C. F.; FILHO, E. G. DE O.; MAFRA, Á. L. Dry mass accumulation, nutrients and decomposition of cover plants. *Journal of Agricultural Science*, v. 11, n. 5, p. 152, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5539/jas.v11n5p152>.

SOUZA, A. P.; MOTA, L. L.; ZAMADEI, T.; MARTIM, C. C.; ALMEIDA, F. T.; PAULINO, J. Classificação climática e balanço hídrico climatológico no estado de Mato Grosso. *Nativa*, v. 01, n. 1, p. 34-43, 2013.

SOUZA, G. S. D.; THIENGO, C. C.; SILVA, M. W. D.; DAN, M. L. **Sistemas silvipastoris e preparo do solo na renovação de pastagens degradadas no Espírito Santo**. In: GONÇALVES, Fabricio Gomes; CALDEIRA, Marcos Vinicius Winckler; SILVA, Gilson Fernandes. p. 253-278, 2021. <https://doi.org/DOI: 10.37885/210705209>.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal** – 3ª edição; Editora Artmed, Porto Alegre/RS, 2004.

TIMM, F.; DUARTE, T. D. S.; NASCIMENTO, P. C. D. Plantas de cobertura para sistemas de plantio direto de hortaliças como estratégia de mitigação da crise climática na produção orgânica de Cucurbitáceas. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 54, p. e79612, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-40632024v5479612>.

TUPICH, F. L. B. **Metanálise do ganho de produtividade da soja com aplicações de fluazinam para o controle do mofo branco**. 2015. 42 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, PR, 2015.

VALANI, G. P.; MARTÍNI, A. F.; PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. C.; COOPER, M. Soil physical quality in the topsoil of integrated and non-integrated grazing systems in a Brazilian Ferralsol. *Soil and Tillage Research*, v. 220, p. 105357, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105357>.

RODRIGUES, R. C.; VALINOTE, A. C.; MOURÃO, G. B.; HERLING, V. R. Reservas orgânicas, relação parte aérea-raiz e C-N e eliminação do meristema apical no Capim-Xaraés sob doses de nitrogênio e potássio. *Ciência Animal Brasileira*, v. 8, n. 3, p. 505-514, 2007.

VIECHTBAUER, W. Conducting meta-analyses in R with the metafor package. *Journal of Statistical Software*, v. 36, p. 1-48, 2010. DOI: <https://doi.org/10.18637/jss.v036.i03>

VILA, V. V.; REZENDE, R.; MALDONADO-SILVA, L. H.; DE FARIA NOCCHI, R. C.; ANDREAN, A. F. B.; WENNECK, G. S.; MATUMOTO-PINTRO, P. T. Microbiota do solo na tolerância de doenças em plantas: Uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 8, p. e25910817161-e25910817161, 2021. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i8.17161>

VILELA, L.; MARTHA JUNIOR, G. B.; MACEDO, M. C. M.; MARCHÃO, R. L.; GUIMARÃES JÚNIOR, R.; PULROLNIK, K.; MACIEL, G. A. Sistemas de integração lavoura-pecuária na região do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, p. 1127-1138, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000003>.

WANG, T.; ZHANG, Z.; LI, Z.; LI, P. Grazing management affects plant diversity and soil properties in a temperate steppe in northern China. **Catena**, v. 158, p. 141–147, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.06.020>.

WIEDER, R. K.; LANG, G. E. A critique of the analytical methods used in examining decomposition data obtained from litterbags. **Ecology**, v. 63, p. 1636-1642, 1982. DOI: <https://doi.org/10.2307/1940104>

WULANNINGTYAS, H. S.; GONG, Y.; LI, P.; SAKAGAMI, N.; NISHIWAKI, J.; KOMATSUZAKI, M. A cover crop and no-tillage system for enhancing soil health by increasing soil organic matter in soybean cultivation. **Soil and Tillage Research**, v. 205, n. 104749, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104749>

APÊNCICE A

Figura A1: Tratamento composto pelo MIX de culturas de cobertura. Tratamento sem a roçagem mecânica (A); tratamento com a roçagem mecânica (B). Fonte: Autoria própria (2023)



Figura A2: Tratamento composto pela braquiária (*U. ruziziensis*). Tratamento sem a roçagem mecânica (A); tratamento com a roçagem mecânica (B). Fonte: Autoria própria (2023)



Figura A3: Vista lateral dos tratamentos 2 e 1. Fonte: Autoria própria (2023)

