

Produção de biomassa e teores de clorofila de plantas de cobertura em solos compactados

Biomass production and chlorophyll contents of cover crops in compacted soils

Producción de biomasa y contenido de clorofila de cultivos de cobertura en suelos compactados

Recebido: 24/03/2023 | Revisado: 09/04/2023 | Aceitado: 11/04/2023 | Publicado: 15/04/2023

Marcella Barroso Oliveira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5381-7717>

Universidade de Rio Verde, Brasil

E-mail: marcellaboliveira@academico.edu.br

June Faria Scherrer Menezes

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8368-1803>

Universidade de Rio Verde, Brasil

E-mail: june@unirv.edu.br

Gustavo Roberti

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9483-3019>

Universidade de Rio Verde, Brasil

E-mail: gugaroberti@hotmail.com

Murilo do Prado Ferreira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8536-4975>

Universidade de Rio Verde, Brasil

E-mail: murilopf.mu@gmail.com

Victor Hugo Custódio Policarpo

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6347-4957>

Universidade de Rio Verde, Brasil

E-mail: victorhugopolicarpo@hotmail.com

Augusto Matias de Oliveira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3556-2030>

Universidade de Rio Verde, Brasil

E-mail: augusto2013ufpi@gmail.com

Carlos César Evangelista de Menezes

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4897-2151>

Universidade de Rio Verde, Brasil

E-mail: carloscesar@unirv.edu.br

Resumo

A compactação do solo é um dos entraves na produção de grãos no cerrado, podendo influenciar na produção de biomassa e alterações fisiológicas, como a produção de clorofilas, nas plantas de cobertura utilizadas para minimizar os danos da compactação e proteção do solo. Assim, objetivou-se avaliar o efeito da compactação do solo na produção de biomassa e teores de clorofila *a*, *b* e total de plantas de cobertura. O experimento foi desenvolvido em casa de vegetação, na Universidade de Rio Verde. Os tratamentos foram estabelecidos pelo esquema fatorial 4 x 2, sendo *Urochloa ruziziensis*, *Panicum maximum* – BRS zuri, milho consorciado com *U. ruziziensis* e milho solteiro, cultivados em solo com e sem compactação. A compactação do solo reduziu a biomassa de todas as plantas de cobertura. O milho solteiro e em consórcio com *U. ruziziensis* crescidos em solo sem compactação forneceram ao solo quantidade maior de biomassa superficial (massa seca da parte aérea e total), enquanto que o consórcio do milho com *U. ruziziensis* em solo compactado proporcionaram maior massa seca de raízes. Comparando os teores de clorofila *a*, *b* e total dentro da própria espécie observa-se que não houve aumento do teor de clorofila quanto a compactação do solo. Portanto, conclui-se que a compactação do solo prejudica a desenvolvimento da biomassa, mas não altera os teores de clorofila das plantas de cobertura.

Palavras-chave: Consórcio; *Urochloa ruziziensis*; *Panicum maximum*; Milho; Alterações fisiológicas.

Abstract

Soil compaction is one of the obstacles to grain production in the cerrado, and may influence biomass production and physiological changes, such as chlorophyll production, in cover crops used to minimize compaction damage and soil protection. Thus, the objective was to evaluate the effect of soil compaction on the production of biomass and chlorophyll *a*, *b* and total contents of cover crops. The experiment was carried out in a greenhouse at the University of Rio Verde. The treatments were established by a 4 x 2 factorial scheme, being *Urochloa ruziziensis*, *Panicum maximum* – BRS zuri, maize intercropped with *U. ruziziensis* and single maize, cultivated in soil with and without compaction. Soil compaction reduced the biomass of all cover crops. Maize alone and intercropped with *U. ruziziensis* grown in soil

without compaction provided the soil with a greater amount of surface biomass (shoot and total dry mass), while maize intercropped with *U. ruziziensis* in compacted soil provided greater dry mass of roots. Comparing the contents of chlorophyll *a*, *b* and total within the same species, it is observed that there was no increase in the chlorophyll content in terms of soil compaction. Therefore, it is concluded that soil compaction impairs the development of biomass, but does not change the chlorophyll content of cover crops.

Keywords: Consortium; *Urochloa ruziziensis*; *Panicum maximum*; Corn; Physiological changes.

Resumen

La compactación del suelo es uno de los obstáculos para la producción de granos en el cerrado y puede influir en la producción de biomasa y en los cambios fisiológicos, como la producción de clorofila, en los cultivos de cobertura utilizados para minimizar el daño por compactación y la protección del suelo. Así, el objetivo fue evaluar el efecto de la compactación del suelo sobre la producción de biomasa y los contenidos de clorofila *a*, *b* y total de cultivos de cobertura. El experimento se llevó a cabo en un invernadero de la Universidad de Rio Verde. Los tratamientos se establecieron mediante un esquema factorial 4 x 2, ser *Urochloa ruziziensis*, *Panicum maximum* – BRS zuri, maíz intercalado con *U. ruziziensis* y maíz simple, cultivado en suelo con y sin compactación. La compactación del suelo redujo la biomasa de todos los cultivos de cobertura. El maíz solo e intercalado con *U. ruziziensis* sembrado en suelo sin compactar proporcionó al suelo una mayor cantidad de biomasa superficial (brote y masa seca total), mientras que el maíz intercalado con *U. ruziziensis* en suelo compactado proporcionó mayor masa seca de raíces. Comparando los contenidos de clorofila *a*, *b* y total dentro de una misma especie, se observa que no hubo incremento en el contenido de clorofila en cuanto a la compactación del suelo. Por lo tanto, se concluye que la compactación del suelo perjudica el desarrollo de la biomasa, pero no modifica el contenido de clorofila de los cultivos de cobertura.

Palabras clave: Consorcio; *Urochloa ruziziensis*; *Panicum maximum*; Maíz; Cambios fisiológicos.

1. Introdução

O Brasil é um dos maiores produtores e exportadores de alimento do mundo, e no cerrado brasileiro há grandes áreas de produção agrícola que, com o passar dos anos, foram beneficiadas com os avanços tecnológicos voltados à produção agrícola (Mores et al., 2022). Quando se trata da produção de grãos, normalmente há o cultivo de duas safras ao ano (Lamichhane et al., 2023), a primeira é chamada de safra de verão, na qual acontece o cultivo principalmente da soja (*Glycine max*) e, após a sua colheita os produtores normalmente cultivam milho (*Zea mays*), isto na segunda safra, também denominada “safrinha”. Os benefícios da rotação de cultura incluem aumento da produtividade, maior eficiência na ciclagem de nutrientes e uso da terra e consequente retorno econômico, fertilidade do solo e controle de pragas (Lamichhane et al., 2023).

Para melhor aproveitamento da produção da “safrinha” é necessário otimizar o tempo entre a colheita da soja e a implantação do milho, isto para seguir corretamente a “janela de plantio” do milho, levando em consideração a região (Khalilzadeh & Wang, 2022). Com a prática do plantio direto, e para que se tenha um melhor aproveitamento do tempo, o investimento em tecnologia mecanizada é imprescindível. No entanto, essa tecnologia pode ter efeitos negativos no solo devido ao aumento do tráfego de máquinas e carga exercida sobre o mesmo, influenciando assim em sua estrutura, no aumento da resistência à penetração, maior densidade, aumento da macroporosidade e diminuição dos macroporos, resultando na sua compactação (Castioni et al., 2021; Rodrigues et al., 2022).

A utilização de espécies forrageiras no sistema de plantio traz benefícios para parte estrutural, química e biológica do solo, além da produção de biomassa (Thapa et al., 2021; Momesso et al., 2022). A produção de biomassa das plantas está ligada ao fator compactação. Com a resistência a penetração e as outras modificações estruturais promovidas pela compactação diminui-se a disponibilidade de água do solo para as plantas, pois com o déficit hídrico a área foliar é afetada, a arquitetura do sistema radicular também, atingindo, conseqüentemente, a produção de biomassa (Lynch et al., 2021). A compactação do solo também pode reduzir o acesso aos nutrientes presentes nas camadas mais profundas, e essa exposição ao estresse ambiental pode resultar em reações fisiológicas nas plantas, sendo a taxa fotossintética uma delas (Morales et al., 2020), conseqüentemente, pode ocorrer alterações na síntese de clorofilas, pois são pigmentos acessórios do processo fotossintético.

O cerrado brasileiro se destaca por possuir clima tropical, com estações bem definidas (chuva e seca) (Silva et al., 2021). Vale ressaltar que a decomposição da palhada no bioma cerrado é acelerada, em regiões tropicais e subtropicais a taxa de

decomposição pode ser até 10 vezes mais acelerada que em regiões de clima temperado (Lal & Logan, 1995; Miranda et al., 2020). Assim, o cultivo de plantas de cobertura vem sendo cada vez mais necessário para obtenção de índices elevados de palhada evitando, conseqüentemente, a exposição do solo e susceptibilidade as erosões, melhoria da qualidade do solo (Abdalla et al., 2019; Adetunji et al., 2020).

Diante do exposto, objetivou-se com o presente estudo avaliar o efeito da compactação do solo na produção de biomassa e teores de clorofila *a*, *b* e total de plantas de cobertura.

2. Metodologia

O experimento foi instalado e conduzido em casa de vegetação na Universidade de Rio Verde, localizada no município de Rio Verde – GO (627p+5w), de dezembro de 2021 à maio de 2022. O delineamento utilizado foi o inteiramente casualizado, em esquema fatorial 4 x 2, com quatro repetições. O primeiro fator consistiu das espécies utilizadas como cobertura, sendo duas forrageiras (*Urochloa ruziziensis* e *Panicum maximum* – BRS zuri), milho consorciado com *U. ruziziensis* e milho solteiro (padrão das fazendas). O segundo fator foi a presença ou ausência de camada compactada com nível de compactação em subsuperfície de 1,65 Mg m⁻³.

As plantas foram cultivadas em vasos constituídos de segmentos com volume total de 16 litros de solo. Os segmentos foram colocados em tubos de PVC de 200 mm de diâmetro, divididos em duas seções, com as seguintes dimensões: 0 a 15 e 15 a 50 cm. Os vasos foram preenchidos com solo da área de mata localizada na Universidade de Rio Verde proveniente do horizonte A de um Latossolo Vermelho distroférico de textura argilosa, coletados na camada de 0-20 cm.

Após a coleta do solo o mesmo foi seco ao ar e peneirado em peneira com malha de 2 mm para caracterização química e textural (Teixeira et al., 2017). Com base nos resultados da análise de solo, o solo utilizado para preencher os vasos teve a sua saturação por bases elevada para 70 % utilizando calcário dolomítico. Após incubação do solo por 30 dias, com umidade próxima a 60 % do volume total de poros, foi realizada a adubação com macro e micronutrientes segundo recomendações de Malavolta (1980) para ensaios em vasos.

A compactação foi formada na camada entre 10 e 15 cm, com densidade de partículas de 0,37 MPa, equivalente a 1,65 mg m⁻³. Inicialmente os vasos foram preenchidos até faltar 15 cm. A partir desse nível, o grau de compactação foi obtido por meio da aplicação de força controlada até atingir o valor pré-estabelecido e, assim, preenchendo-se até o nível de 10 cm, pelo método de Proctor normal (Nogueira, 1995). O restante do vaso foi preenchido com solo sem aplicação de força.

Em cada vaso foram semeadas três sementes, conforme a espécie, e após a germinação das sementes e emergência das plântulas, foi selecionada a mais vigorosa. As demais foram desbastadas após 15 dias de emergidas. Foi mantida apenas uma planta por vaso durante o período de 45 dias. A umidade do solo foi mantida em torno de 80 % da sua capacidade de campo. Para determinação da umidade do solo, os vasos foram pesados, individualmente, todos os dias, sendo que a adição de água foi realizada com base nos valores de referência supracitados.

No 45° dia foram avaliados os teores de clorofila *a*, *b* e total com clorofiLOG e em seguida as plantas foram cortadas rente ao solo e o material vegetal foi colocado em estufa de circulação forçada à 65 °C até atingir peso constante, e determinado a massa seca de raízes, parte aérea e total em balança analítica e de precisão.

A massa seca de raízes, parte aérea e total e os teores de clorofila *a*, *b* e total foram submetidos à análise de normalidade multivariada pelo teste de Doornik e Hansen (2008) ($p < 0,05$) e análise de variância multivariada pelos testes de Lambda de Wilks, Traço de Pillai, Traço de Hotelling-Lawley e Raíz máxima de Roy ($p < 0,05$).

A análise discriminante canônica foi utilizada para discriminar os grupos de tratamentos em função das variáveis, construindo-se um gráfico biplot para as duas primeiras variáveis canônicas. Elipses de 95 % de confiança foram construídas a fim de detectar diferenças estatísticas ($p < 0,05$) entre grupos de tratamentos. As análises foram realizadas com o software R

versão 4.2.3 (R core team, 2023). O pacote candisc foi utilizado na análise discriminante canônica (Friendly & Fox, 2015).

Uma rede de correlação entre as variáveis foi construída de acordo com a correlação de *Pearson* (limiar fixado em 0,60), em que a proximidade entre os nós é proporcional aos valores de correlação absoluta entre as variáveis. O software utilizado foi o Rbio (Bhering, 2017).

3. Resultados e Discussão

De acordo com os testes multivariados de Traço de Pillai, Lambda de Wilks, Traço de Hotelling-Lawley e Raíz máxima de Roy houve diferença significativa entre os tratamentos para massa seca de raízes (MSR), parte aérea (MSPA) e total (MST) e clorofila *a* (Ca), *b* (Cb) e total (CT) de plantas de *Urochloa ruziziensis*, *Panicum maximum*, milho consorciado com *U. ruziziensis* e milho solteiro crescidas em solo com ou sem compactação (Tabela 1).

Tabela 1 - Análise de variância multivariada para os vetores de médias dos teores de massa seca de raízes, parte aérea e total e clorofila *a*, *b* e total de plantas de *Urochloa ruziziensis*, *Panicum maximum*, milho consorciado com *U. ruziziensis* e milho solteiro crescidas em solo com ou sem compactação.

Estatísticas	Valor	¹ num Df	² den Df	Aprox. F	Pr > (F)
Traço de Pillai	2,28	42	92,57	2,10	0.00065***
Lambda de Wilks	0,01	42	144	3,45	3.656e-07 ***
Traço de Hotelling-Lawley	14,91	42	104	6,15	2.701e-14 ***
Raíz máxima de Roy	12,24	7	24	41,96	6.062e-12 ***

¹ num Df: grau de liberdade do numerador; ² den Df: grau de liberdade do denominador. '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05. Fonte: Autores.

As duas primeiras variáveis canônicas explicaram 93,09 % da variância total contida entre as variáveis MSR, MSPA, MST, Ca, Cb e CT (Tabela 3). A primeira variável canônica (Can.1) está mais fortemente correlacionada com as variáveis MSPA, MT, Ca e Cb, explicando 82,07 % da variância original. A segunda variável canônica (Can.2) está mais fortemente correlacionada com as variáveis MSR e CT, explicando 11,02 % da variação original (Tabela 2).

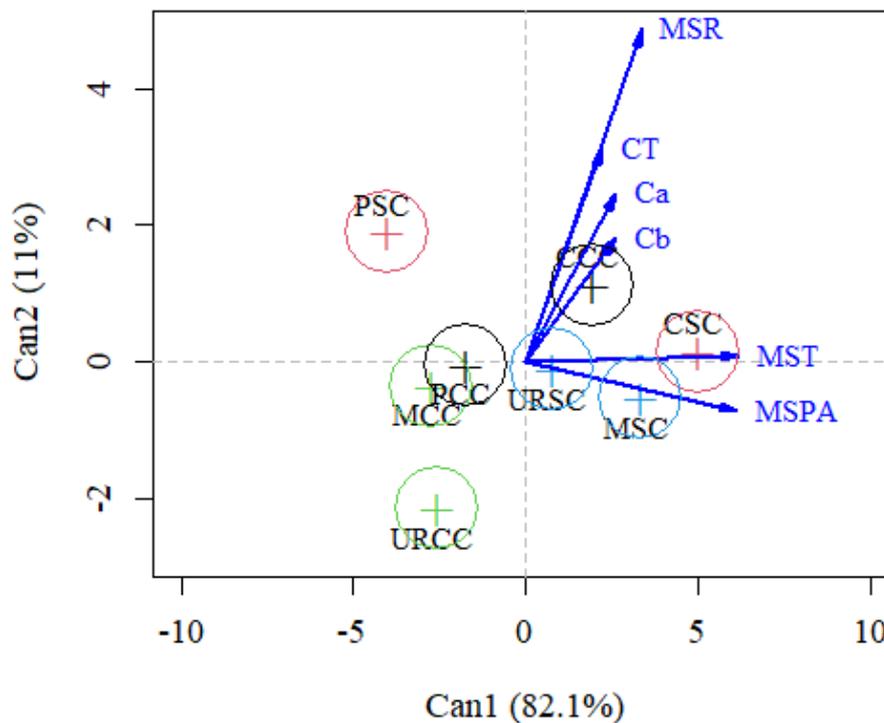
Tabela 2 - Coeficientes, autovalores e variância explicada pelas variáveis canônicas para as variáveis massa seca de raízes, parte aérea e total e clorofila *a*, *b* e total de plantas de *Urochloa ruziziensis*, *Panicum maximum*, milho consorciado com *U. ruziziensis* e milho solteiro crescidas em solo com ou sem compactação.

Variáveis	Variáveis canônicas	
	Can 1	Can 2
Massa seca de raízes	0,54	-0,79
Massa seca da parte aérea	0,99	0,12
Massa seca total	1,00	-0,01
Teor de clorofila <i>a</i>	0,42	-0,40
Teor de clorofila <i>b</i>	0,43	-0,29
Teor de clorofila total	0,36	-0,51
Autovalor	12,24	1,64
Variância explicada (%)	82,07	11,02
Variância cumulativa (%)	82,07	93,09

Fonte: Autores.

As plantas de *U. ruziziensis*, *P. maximum*, milho consorciado com *U. ruziziensis* e milho solteiro tiveram seu desenvolvimento prejudicado pela compactação do solo, apresentando biomassa menor quando cultivadas em solo compactado (Figura 1). A diferença da produção de biomassa entre as espécies em parte se deve a própria anatomia das plantas, pois as plantas de milho podem chegar a mais de 2 m de altura (Embrapa, 2015), enquanto que *U. ruziziensis* ficam entre 0,8 a 1,1 m (Embrapa, 2022) e as de *P. maximum* podem ter entre 1,0 e 1,5 m (Germipasto, 2023). Quando se analisa as espécies individualmente, observa-se que no geral tiveram melhores biomassa de raízes e parte aérea, bem como maiores teores de clorofila quando cultivadas em solo sem compactação (Figura 1). No entanto, o milho plantado em consórcio com a *U. ruziziensis* tiveram maior MSR quando cultivados em solo compactado. Isso pode ter ocorrido pelo fato de as espécies terem sido cultivadas em consórcio, portanto tem a competição por recursos como água e nutrientes numa aérea limitada, resultando consequentemente na mudança da arquitetura do sistema radicular de forma a proporcionar maior área de exploração do solo e vantagem na competitividade, pois a anatomia das raízes tem um papel fundamental na aquisição de recursos do solo (Lynch et al., 2021).

Figura 1 - Análise de variância multivariada para os vetores de médias dos teores de massa seca de raízes (MSR), parte aérea (MSPA) e total (MST) e clorofila *a* (Ca), *b* (Cb) e total (CT) de plantas de *Urochloa ruziziensis*, *Panicum maximum*, milho consorciado com *U. ruziziensis* (consórcio) e milho solteiro crescidas em solo com ou sem compactação. URCC, PCC, CCC, MCC: Plantas de *U. ruziziensis*, *P. maximum*, consórcio e milho solteiro crescidas em solo compactado, respectivamente; URSC, PSC, CSC, MSC: Plantas de *U. ruziziensis*, *P. maximum*, consórcio e milho solteiro crescidas em solo sem compactação, respectivamente.



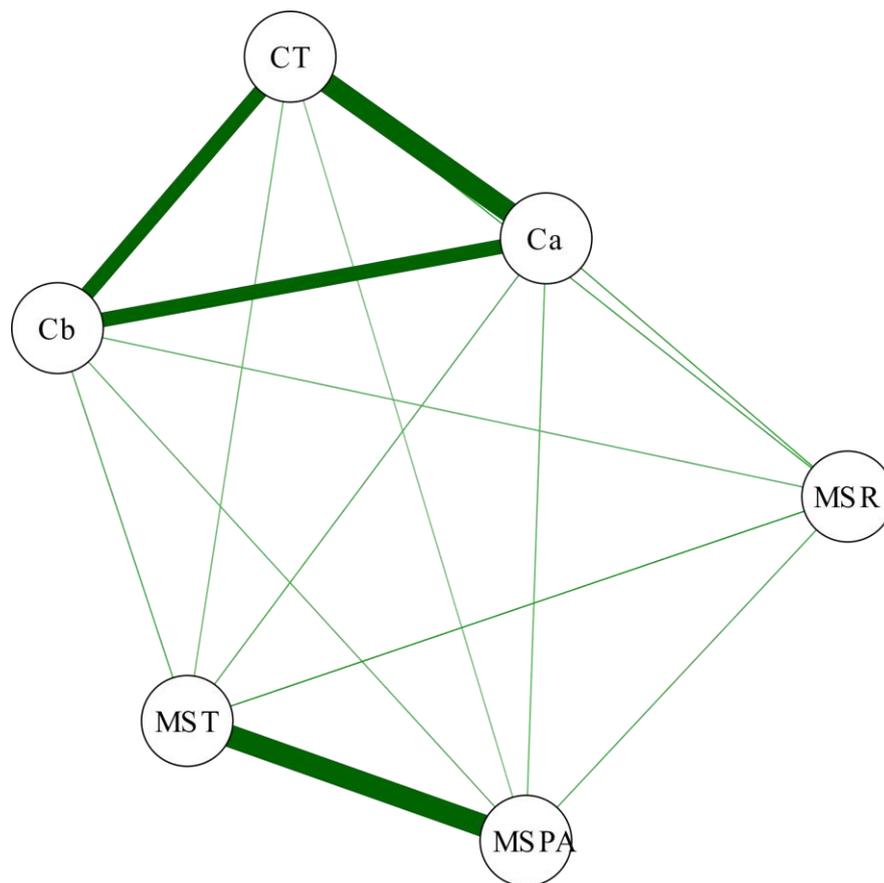
Fonte: Própria dos autores.

O milho solteiro e em consórcio com *U. ruziziensis* em solo sem compactação tiveram maior desenvolvimento da parte aérea, proporcionando maior biomassa da parte aérea e total (Figura 2). As plantas em consórcio cultivadas em solo compactado foram capazes de fornecer mais biomassa do que a *U. ruziziensis* e *P. maximum* crescidas em solo sem compactação (Figura 2). Os teores de clorofila *a* e *b* foram mais altos nas plantas de milho em consórcio com *U. ruziziensis* cultivadas em solo com e sem compactação, enquanto que o de clorofila total foi mais alto nas plantas em consórcio crescidas em solo compactado.

Como as plantas crescidas em consórcio e em solo compactado tem menos acesso aos nutrientes presente no solo e também competição por recursos entre as espécies, a exposição ao estresse ambiental pode resultar em reações fisiológicas nas plantas, sendo a taxa fotossintética uma delas (Morales et al., 2020). Provavelmente precisam aumentar a taxa fotossintética para a obtenção maior de fotoassimilados para seu crescimento e desenvolvimento.

Os teores de clorofila *a*, *b* e total correlacionaram-se positiva e significativamente (Ca e $Cb = 0,84$; Ca e $CT = 0,96$; e Cb e $CT = 0,84$), da mesma maneira que a $MSPA$ com a MST (0,99) (Figura 2). As clorofilas *a* e *b* são pigmentos associados à fotossíntese, sendo encontradas geralmente a proporção de 3:1, respectivamente (Streit et al., 2005). A clorofila *a* é a mais abundante nas plantas, por isso encontrada em maior quantidade que a *b* (Figura 1) e atua na síntese de substâncias orgânicas, sendo utilizada na etapa fotoquímica da fotossíntese, e a clorofila *b* é um pigmento acessório responsável por aumentar faixa de absorção de luz que pode ser utilizada na fotossíntese (Streit et al., 2005).

Figura 2 - Rede de correlação ilustrando as correlações de Pearson entre as variáveis massa seca de raízes (MSR), parte aérea ($MSPA$) e total (MST) e clorofila *a* (Ca), *b* (Cb) e total (CT) de plantas de *Urochloa ruziziensis*, *Panicum maximum*, milho consorciado com *U. ruziziensis* (consórcio) e milho solteiro crescidas em solo com ou sem compactação. As linhas mais espessas e verdes representam as correlações positivas mais altas.



Fonte: Própria dos autores.

A correlação positiva entre a $MSPA$ e a MST é esperado, pois a $MSPA$ tem maior peso na MST do que a MSR . No entanto, o bom desenvolvimento da parte aérea das plantas se deve também ao sistema radicular, pois quanto mais bem estruturado for o sistema radicular maior será a absorção de água e nutrientes pelas plantas (Parađiković et al., 2018; Naik et al., 2019), resultando em melhor desenvolvimento da parte aérea, como observado no estudo, pois embora a correlação da MSR com a $MSPA$ e MST não tenha sido significativa, foi positiva.

4. Conclusões

A compactação do solo prejudica o desenvolvimento das plantas de *U. ruziziensis*, *P. maximum*, milho solteiro e consorciado com *U. ruziziensis*.

As plantas de milho em consórcio com *U. ruziziensis* crescidas em solo compactado desenvolveram maior biomassa subsuperficial que as plantas de *U. ruziziensis*, *P. maximum* e milho solteiro crescidas em solo sem compactação.

A compactação do solo teve pouca influência nos teores de clorofila *a*, *b* e total.

Referências

- Abdalla, M., Hastings, A., Cheng, K., Yue, Q., Chadwick, D., Espenberg, M., ... & Smith, P. (2019). A critical review of the impacts of cover crops on nitrogen leaching, net greenhouse gas balance and crop productivity. *Global change biology*, 25(8), 2530-2543. <https://doi.org/10.1111/gcb.14644>.
- Adetunji, A. T., Ncube, B., Mulidzi, R., & Lewu, F. B. (2020). Management impact and benefit of cover crops on soil quality: A review. *Soil and Tillage Research*, 204, 104717. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104717>.
- Bhering, L. L. (2017). Rbio: A tool for biometric and statistical analysis using the R platform. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 17, 187-190.
- Castioni, G. A., de Lima, R. P., Cherubin, M. R., Bordonal, R. O., Rolim, M. M., & Carvalho, J. L. (2021). Machinery traffic in sugarcane straw removal operation: Stress transmitted and soil compaction. *Soil and Tillage Research*, 213, 105122. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105122>.
- Doomik, J. A., & Hansen, H. (2008). An omnibus test for univariate and multivariate normality. *Oxford bulletin of economics and statistics*, 70, 927-939. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0084.2008.00537.x>.
- Embrapa. (2015). Cultivo do milho. Sistemas de produção Embrapa. (9a ed.), https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p_p_id=conteudoportlet_WAR_sistemasdeproducao6_1ga1ceportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&p_r_p_-76293187_sistemaProducaoId=7905&p_r_p_-996514994_topicoId=8662.
- Embrapa. (2022). Brasil cria a sua primeira cultivar do capim *Brachiaria ruziziensis*. <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/68876481/brasil-cria-a-sua-primeira-cultivar-de-capim-brachiaria-ruziziensis>.
- Friendly, M., & Fox, J. Candisc: Visualizing generalized canonical discriminant and canonical correlation analysis. R package version 0.8-0.2017. <https://CRAN.R-project.org/package=candisc>.
- Germipasto. (2023). BRS ZURI. <https://www.germipasto.agr.br/produtos/ver/21/>.
- Khalilzadeh, Z., & Wang, L. (2022). Corn planting and harvest scheduling under storage capacity and growing degree units uncertainty. *Scientific Reports*, 12(1), 22482. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25797-9>.
- Lal, R., & Logan, T. J. (2018). Agricultural activities and greenhouse gas emissions from soils of the tropics. In: Lal, R., Kimble, J. M., Levine, E., & Stewart, B.A. In *Soil management and greenhouse effect*, CRC Press, 1, 293-307.
- Lamichhane, J. R., Alletto, L., Cong, W. F., Dayoub, E., Maury, P., Plaza-Bonilla, D., Reckling, M., Saia, S., Soltani, E., Tison, G., & Debaeke, P. (2023). Relay cropping for sustainable intensification of agriculture across temperate regions: Crop management challenges and future research priorities. *Field Crops Research*, 291, 108795. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108795>.
- Lynch, J. P., Strock, C. F., Schneider, H. M., Sidhu, J. S., Ajmera, I., Galindo-Castañeda, T., Klein, S. P., & Hanlon, M. T. (2021). Root anatomy and soil resource capture. *Plant and Soil*, 466, 21-63. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05010-y>.
- Malavolta, E. (1980). Elementos de nutrição mineral de plantas. São Paulo: Ceres, 251 p.
- Miranda, K. F. G., Torres, J. L. R., Charlo, H. C. D. O., Junior, V. O., Favaro, J. H. D. S., & de Souza, Z. M. (2020). Sweet corn in no-tillage system on cover crop residues in the Brazilian Cerrado. *Australian Journal of Crop Science*, 14(6), 947-952. <https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.317449949952405>.
- Momesso, L., Crusciol, C. A., Leite, M. F., Bossolani, J. W., & Kuramae, E. E. (2022). Forage grasses steer soil nitrogen processes, microbial populations, and microbiome composition in a long-term tropical agriculture system. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 323, 107688. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107688>.
- Morales, F., Ancín, M., Fakhret, D., González-Torralba, J., Gámez, A. L., Seminário, A., Soba, D., Mariem, S. B., Garroga, M., & Aranjuelo, I. (2020). Photosynthetic metabolism under stressful growth conditions as a bases for crop breeding and yield improvement. *Plants*, 9(1), 88. <https://doi.org/10.3390/plants9010088>.
- Mores, G. D. V., Dewes, H., Talamini, E., Vieira-Filho, J. E. R., Casagrande, Y. G., Malafaia, G. C., Costa, C., Spanhol-Finocchio., & Zhang, D. (2022). A Longitudinal Study of Brazilian Food Production Dynamics. *Agriculture*, 12(11), 1811. <https://doi.org/10.3390/agriculture12111811>.
- Naik, K., Mishra, S., Srichandan, H., Singh, P. K., & Sarangi, P. K. (2019). Plant growth promoting microbes: Potential link to sustainable agriculture and environment. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 21, 101326. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101326>.
- Nogueira, J. B. (1995). Mecânica dos solos: ensaios de laboratório. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 248 p.

Paradić, N., Teklić, T., Zeljković, S., Lisjak, M., & Špoljarević, M. (2018). Biostimulants research in some horticultural plant species—A review. *Food and Energy Security*, 8(2), e00162. <https://doi.org/10.1002/fes3.162>.

R core team. (2023). R: A language and environment for statistical computing. *Vienna: R Foundation for Statistical Computing*, 2022. <https://www.R-project.org/>.

Rodrigues, M. F., Rodrigues, D., Pellegrini, A., & Pocojeski, E. (2022). Gradual increase in the intensity of machine traffic in timber harvesting: effects on soil composition and functionality. *Southern Forests: a Journal of Forest Science*, 84(2), 148-163. <https://doi.org/10.2989/20702620.2022.2102452>.

Silva, P. C., Ribeiro Junior, W. Q., Ramos, M. L. G., Celestino, S. M. C., Silva, A. D. N., Casari, R. A. D. C. N., Santana, C. C., Lima, C. A., Williams, T. C. R., & Vinson, C. C. (2021). Quinoa for the Brazilian Cerrado: Agronomic characteristics of elite genotypes under different water regimes. *Plants*, 10(8), 1591. <https://doi.org/10.3390/plants10081591>.

Streit, N. M., Canterle, L. P., Canto, M. W. D., & Hecktheuer, L. H. H. (2005). The chlorophylls. *Ciência Rural*, 35, 748-755. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782005000300043>.

Teixeira, P. C., Donagemma, G. K., Fontana, A., Teixeira, W. G. C. (2017). Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. Brasília, DF: *Embrapa CNPS*. 573p. <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1085209>.

Thapa, V. R., Ghimire, R., Acosta-Martínez, V., Marsalis, M. A., & Schipanski, M. E. (2021). Cover crop biomass and species composition affect soil microbial community structure and enzyme activities in semiarid cropping systems. *Applied Soil Ecology*, 157, 103735. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103735>.