



AValiação de atributos físicos do solo em diferentes tempos de uso no estado de Mato Grosso

EVALUATION OF SOIL PHYSICAL ATTRIBUTES AT DIFFERENT TIMES OF USE IN THE STATE OF MATO GROSSO

EVALUACIÓN DE LOS ATRIBUTOS FÍSICOS DEL SUELO EN DIFERENTES ÉPOCAS DE USO EN EL ESTADO DE MATO GROSSO

Natalia Vigolo¹, Ana Carmen Ribeiro Scherner¹, Felipe Vieira Lopes¹, Jean Lucas Navarro Fernandez¹, João Vitor Vidal de Souza¹, Samuel Moreira Coelho Ruppim¹, Carlos Eduardo Cruz Texeira Zanin¹

e565269

<https://doi.org/10.47820/recima21.v5i6.5269>

PUBLICADO: 06/2024

RESUMO

A intensa atividade agrícola ao longo do tempo é capaz de afetar os atributos físicos do solo. Neste sentido, esse trabalho buscou avaliar as diferenças dos principais atributos físicos de um Latossolo Vermelho-escuro em diferentes tempos de uso. O estudo foi realizado na Fazenda Vitória, localizada na cidade de Feliz Natal, estado de Mato Grosso, Brasil, com cinco tratamentos em observação: T1 – área de 4 anos de cultivo, T2 – área de 17 anos de cultivo, T3 – área de 19 anos de cultivo, T4 – área de 20 anos de cultivo; e T5 – mata nativa. Os atributos físicos do solo analisados foram densidade, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, densidade relativa e resistência do solo à penetração. Os resultados mostraram que houve variação nos valores de densidade do solo, macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade relativa. Os valores de resistência do solo à penetração foram variáveis em função do tratamento, mas não atingiram os valores limites de resistência adotados. Dessa forma, conclui-se que, o tratamento 1, cuja textura é de solo mais arenoso, foi aquele que apresentou os maiores valores de densidade do solo e menores teores de macroporosidade. Os valores de densidade relativa apontam para o tratamento 4 na profundidade 5-10 cm e o tratamento 5, em ambas as profundidades de estudo, como aqueles que têm menor nível de compactação. Já o tratamento 4 foi aquele que apresentou maior resistência do solo entre os tratamentos estudados.

PALAVRAS-CHAVE: Análise do solo. Latossolo Vermelho-escuro. Manejo do solo. Porosidade.

ABSTRACT

Intense agricultural activity over time is capable of affecting the physical attributes of the soil. In this sense, this work sought to evaluate the differences in the main physical attributes of a Dark Red Oxisol at different times of use. The study was carried out at Fazenda Vitória, located in the city of Feliz Natal, state of Mato Grosso, Brazil, with five treatments under observation: T1 – area of 4 years of cultivation, T2 – area of 17 years of cultivation, T3 – area of 19 years of cultivation, T4 – area of 20 years of cultivation; and T5 – native forest. The physical attributes of the soil analyzed were density, total porosity, macroporosity, microporosity, relative density and soil resistance to penetration. The results showed that there was variation in the values of soil density, macroporosity, microporosity, total porosity and relative density. The soil resistance values to penetration varied depending on the treatment but did not reach the adopted resistance limit values. Therefore, it is concluded that treatment 1, whose texture is sandier soil, was the one that presented the highest soil density values and lowest macroporosity levels. The relative density values point to treatment 4 at depth 5-10 cm and treatment 5 at both study depths as those with the lowest level of compaction. Treatment 4 was the one that showed the greatest soil resistance among the treatments studied.

KEYWORDS: Dark red latosol. Soil analysis. Soil management. Porosity.

RESUMEN

La intensa actividad agrícola a lo largo del tiempo es capaz de afectar los atributos físicos del suelo. En este sentido, este trabajo buscó evaluar las diferencias en los principales atributos físicos de un Oxisol Rojo Oscuro en diferentes momentos de uso. El estudio se realizó en la Fazenda Vitória, ubicada en la

¹ Universidade Federal de Mato Grosso.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

AVALIAÇÃO DE ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO EM DIFERENTES TEMPOS DE USO NO ESTADO DE MATO GROSSO
Natalia Vigolo, Ana Carmen Ribeiro Scherner, Felipe Vieira Lopes, Jean Lucas Navarro Fernandez, João Vitor Vidal de Souza,
Samuel Moreira Coelho Ruppim, Carlos Eduardo Cruz Texeira Zanin

ciudad de Feliz Natal, estado de Mato Grosso, Brasil, con cinco tratamientos en observación: T1 – área de 4 años de cultivo, T2 – área de 17 años de cultivo, T3 – área de 19 años de cultivo, T4 – área de 20 años de cultivo; y T5 – bosque nativo. Los atributos físicos del suelo analizados fueron densidad, porosidad total, macroporosidad, microporosidad, densidad relativa y resistencia del suelo a la penetración. Los resultados mostraron que hubo variación en los valores de densidad del suelo, macroporosidad, microporosidad, porosidad total y densidad relativa. Los valores de resistencia del suelo a la penetración variaron según el tratamiento, pero no alcanzaron los valores límite de resistencia adoptados. Por lo tanto, se concluye que el tratamiento 1, cuya textura es suelo más arenoso, fue el que presentó mayores valores de densidad del suelo y menores niveles de macroporosidad. Los valores de densidad relativa señalan al tratamiento 4 a una profundidad de 5-10 cm y al tratamiento 5 en ambas profundidades de estudio como los de menor nivel de compactación. El tratamiento 4 fue el que mostró mayor resistencia del suelo entre los tratamientos estudiados.

PALABRAS CLAVE: *Análisis del suelo. Latosol rojo oscuro. Manejo del suelo. Porosidad.*

INTRODUÇÃO

Segundo a Embrapa (1999), o solo é uma coleção de corpos naturais, constituídos por partes sólidas, líquidas e gasosas, tridimensionais, dinâmicos, formados por materiais minerais e orgânicos, contendo matéria viva e ocupando a maior parte do manto superficial das extensões continentais do planeta.

Em razão da sua grande extensão e interação de diferentes formas e tipos de relevo, vegetação, clima, material de origem e organismos vivos, o Brasil dispõe de uma grande variedade de classes de solos. No cerrado, ressalta a presença dos Latossolos, cobrindo quase 46% da área (Sano *et al.*, 2008; Santos *et al.*, 2016), com propriedades físicas que o caracteriza como favorável à agricultura (Cavenage *et al.*, 1999) embora apresente baixa fertilidade natural, acidez acentuada e reduzido teor de matéria orgânica (Cunha *et al.*, 2008).

A região do Centro-Oeste, onde predomina o bioma Cerrado e, portanto, os Latossolos, configuram grande extensão de solos profundos, bem drenados, de baixa fertilidade natural, com condições topográficas que permitem intensa mecanização agrícola das lavouras (Manzatto *et al.*, 2002). A expansão agrícola nessas áreas foi estimulada pelo aumento de investimentos na região, promovendo avanços tecnológicos que possibilitaram o cultivo comercial (Freitas, 2011). Assim, nas últimas décadas a vegetação nativa do Centro-Oeste tem sido substituída por pastagens plantadas e culturas anuais, como soja, milho e algodão, alterando o uso da terra (Marchão *et al.*, 2009).

Com o intenso uso agrícola do solo, os atributos físicos são afetados, podendo resultar em camadas compactadas, redução da permeabilidade, taxa de infiltração de água e aeração (Fontana *et al.*, 2016). Portanto, se faz necessário a adoção de técnicas de manejo conservacionistas, a fim de proporcionar condições adequadas para o crescimento e desenvolvimento das plantas, uma vez que, segundo Koppi (1991), a estrutura ideal do solo é aquela que possibilita maior área de contato raiz-solo, suficiente espaço poroso para o movimento da água e gases e pouca resistência à penetração das raízes.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

AValiação DE Atributos Físicos DO SOLO EM Diferentes Tempos DE USO NO Estado DE MATO GROSSO
Natalia Vigolo, Ana Carmen Ribeiro Scherner, Felipe Vieira Lopes, Jean Lucas Navarro Fernandez, João Vitor Vidal de Souza,
Samuel Moreira Coelho Ruppim, Carlos Eduardo Cruz Teixeira Zanin

Ao alterar o uso da terra passando de uma condição natural para uma condição de cultivo, as propriedades físicas do solo são afetadas. De modo geral, as propriedades químicas são melhoradas e as físicas deterioradas (Costa *et al.*, 1996) a depender da intensidade do uso.

Os atributos físicos são influenciados pelas práticas de manejo adotadas. O manejo inadequado pode causar redução de macroporosidade e aumento da densidade (Fontana *et al.*, 2016). Segundo Volpe (2008), os solos do Cerrado estão apresentando redução na qualidade física-hídricos em função da degradação pelo uso indiscriminado com pastagens extensivas e a prática de monoculturas.

No entanto, Braida *et al.*, (2006) apresentam como solução a esse panorama a prática de manejo sistema de plantio direto; que é capaz de reverter a degradação das propriedades do solo e melhorar sua qualidade. O sistema de plantio direto proporciona cobertura do solo capaz de reduzir sua compactação, já que a matéria orgânica dissipa a energia vinda do trânsito de máquinas sobre o solo (Reichert *et al.*, 2010), e o acúmulo dela melhora a estruturação do solo ao aumentar a estabilidade de agregados (Sales *et al.*, 2016).

A prática de rotação de culturas também contribui para a melhoria física do solo quando utilizado espécies com sistema radicular abundante e grande quantidade de matéria seca. Aita (2004) afirma que as gramíneas atuam positivamente nas propriedades do solo, devido sua eficiência na ciclagem de nutrientes, podendo proporcionar um melhor desempenho da cultura sucessiva. Alguns estudos comprovaram os benefícios da rotação de gramíneas com a soja, Debiasi *et al.*, (2010) registraram maior produtividade da soja quando utilizado aveia preta na sucessão, Genro Junior *et al.* (2009) confirmaram o mesmo para o uso de crotalaria em sucessão com a soja.

Uma maneira de avaliar a qualidade do solo é o uso de indicadores que permitem a avaliação da situação atual e a identificação de pontos críticos (Melo Filho *et al.*, 2007). Para Lima *et al.*, (2007) os indicadores físicos de qualidade do solo usualmente utilizados são: a densidade, a porosidade, a estabilidade de agregados e a resistência mecânica do solo à penetração.

A densidade do solo é um importante indicador do estado de conservação, principalmente sobre infiltração e retenção de água no solo, desenvolvimento das raízes, trocas gasosas e nos processos erosivos, sendo muito utilizada na avaliação da compactação dos solos (Fuentes-Llanillo *et al.*, 2006). Ainda não há consenso sobre o nível crítico de densidade, acima do qual o desenvolvimento das plantas é prejudicado e o solo é considerado compactado. Porém, maiores valores têm sido observados para solos arenosos, relatando um intervalo de 1,35 a 1,85 Mg m⁻³ (Araújo *et al.*, 2004), enquanto para solos argilosos os valores são registrados entre 1,08 e 1,33 Mg m⁻³ (Secco *et al.*, 2005).

A porosidade está diretamente associada com a textura e estrutura do solo. Segundo Sanchez (2012), a porosidade do solo diz respeito ao volume do solo não ocupado por sólidos, isto é, todo o espaço ocupado por ar e água, dividido em macro e microporos, baseados pelo diâmetro dos poros. Nos primeiros, ocorrem os processos de aeração de drenagem, enquanto no segundo, a retenção de água (Bertol *et al.*, 2004). Para Watanabe *et al.* (2002), valores de porosidade de aeração abaixo de



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

AValiação de atributos físicos do solo em diferentes tempos de uso no estado de Mato Grosso
Natalia Vigolo, Ana Carmen Ribeiro Scherner, Felipe Vieira Lopes, Jean Lucas Navarro Fernandez, João Vitor Vidal de Souza,
Samuel Moreira Coelho Ruppim, Carlos Eduardo Cruz Texeira Zanin

0,10 a 0,15 m³ m⁻³ são, de modo geral, considerados restritos para o crescimento e produtividade da maioria das culturas.

Para Bengough & Mullins (1990), o método mais conveniente para estimar a resistência do solo ao crescimento radicular é a penetrometria, apesar de existir diferentes procedimentos experimentais capazes de avaliar a resistência mecânica do solo. Alguns fatores podem influenciar os resultados dessa análise, como a textura, densidade do solo e conteúdo de água (Camargo; Alleoni, 1997). Além disso, Daniel *et al.* (1995) acrescentam a umidade, pois há uma tendência em diminuir o efeito da compactação com o aumento da umidade, tanto para a quantidade de energia necessária para mobilização do solo, como para penetração do sistema radicular.

A densidade do solo não é suficiente para quantificar o grau de compactação de um solo agrícola, pois esta pode sofrer alterações a depender da textura do solo e o teor de matéria orgânica que ele possui. Portanto, urgiu o interesse em determinar o grau de compactação de um solo em função da sua textura e outras propriedades, isto é, para cada solo em estudo, pois a máxima densidade e a densidade ótima no campo, ou aquela limitante para o desenvolvimento das plantas, será dependente desses fatores (Marcolin, 2006). Assim, definiu-se a densidade relativa do solo.

MATERIAIS E MÉTODOS

Localização da área de estudo

O experimento foi conduzido na Fazenda Vitória, localizada na área rural do município de Feliz Natal, estado de Mato Grosso, Brasil, nas coordenadas de 12°27'40" de Latitude Sul e 55°01'56" de Longitude Oeste de Greenwich, altitude de 397 m. O solo foi classificado como Latossolo Vermelho-escuro. As áreas de estudo adotam o sistema de cultivo mínimo para sucessão de soja (*Glycine Max*) e milho (*Zea mays*), no entanto, variam em tempo de uso do solo.

A propriedade adota o sistema de cultivo mínimo para todas as áreas de cultivo, com exceção dos dois primeiros anos após abertura das áreas, onde praticou-se sistema convencional de plantio para a cultura do arroz.

Coleta das amostras

Foi estabelecida uma malha amostral de 25 pontos entre cinco tratamentos, compondo duas profundidades, 5-10 cm e 15-20 cm, totalizando 10 amostras por tratamento e 50 amostras totais. O procedimento de análise foi realizado seguindo as normas da Embrapa (2017). Os tratamentos se encontram na Tabela 1.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

AVALIAÇÃO DE ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO EM DIFERENTES TEMPOS DE USO NO ESTADO DE MATO GROSSO
Natalia Vigolo, Ana Carmen Ribeiro Scherner, Felipe Vieira Lopes, Jean Lucas Navarro Fernandez, João Vitor Vidal de Souza,
Samuel Moreira Coelho Ruppim, Carlos Eduardo Cruz Texeira Zanin

Tabela 1 – Tempo de uso nas áreas de estudo

Tratamentos (T)

T1: Área de 4 anos de cultivo (2 anos de arroz; 2 anos de soja e milho)

T2: Área de 17 anos de cultivo (soja e milho)

T3: Área de 19 anos de cultivo (soja e milho)

T4: Área de 20 anos de cultivo (soja e milho)

T5: Testemunha (mata nativa)

O modo de coleta adotado foi extração de amostras de solo com estrutura indeformada para que fosse determinado a densidade e porosidade do solo pelo método do cilindro volumétrico. Todas as amostras foram coletadas em dezembro de 2023 tendo-se o cuidado de retirar os restos de cultura da superfície.

Também foram coletadas amostras simples nos mesmos pontos dos anéis volumétricos para que misturasse em uma única amostra composta por tratamento, a fim de determinar a textura e a curva característica de compactação do solo. A análise granulométrica foi realizada pelo método do densímetro, a partir do qual foram calculadas as concentrações de silte, argila e areia. O ensaio de compactação pelo método de Proctor Normal proporcionou a elaboração dos gráficos de curvas de compactação do solo, pelo qual foi possível determinar a densidade máxima do solo a ser utilizada no cálculo da densidade relativa.

Além disso, para a determinação da resistência do solo à penetração foi utilizado o penetrômetro de impacto, com os pontos de penetração próximos da coleta de amostra indeformada, a fim de proporcionar as mesmas condições para todas as análises.

A amostra de umidade do solo teve sua pesagem realizada ainda à campo, com o auxílio de uma balança de resolução 1g. A retirada foi feita com o trado holandês e as cápsulas foram vedadas com fita.

Granulometria do solo

O método do densímetro foi utilizado para determinar a granulometria do solo, conforme Embrapa (2017). Foram pesadas 50 g de amostra com duas repetições, adicionando-se 250 mL de água e 10 mL de NaOH 1N em um recipiente. Foi feita uma breve agitação de 1 minuto com bastão plástico. Ao finalizar a agitação foi introduzido cuidadosamente o densímetro na suspensão e feito a leitura de concentração de silte + argila. Após uma hora e meia de sedimentação, transferiu-se o volume para proveta de 250 mL e agitou-se. Novamente foi introduzido o densímetro e efetuou-se a leitura com aproximação de 1 g L⁻¹.

Curvas de compactação do solo

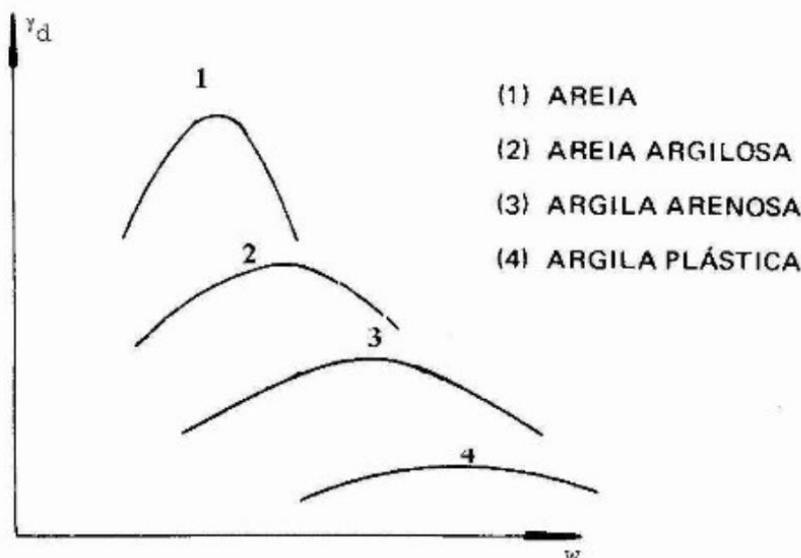
As curvas de compactação do solo sofrem influência da textura do solo. Para efeito de caracterização, observa-se a imagem seguinte.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

AValiação de atributos físicos do solo em diferentes tempos de uso no estado de Mato Grosso
Natalia Vigolo, Ana Carmen Ribeiro Scherner, Felipe Vieira Lopes, Jean Lucas Navarro Fernandez, João Vitor Vidal de Souza,
Samuel Moreira Coelho Ruppim, Carlos Eduardo Cruz Texeira Zanin

Figura 1 – Curvas de compactação para diferentes tipos de solo



Fonte: Machado *et al.* (2001)

As curvas de compactação do solo para esse trabalho foram projetadas a partir do ponto de friabilidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Granulometria do solo

A Tabela 2 apresenta os dados de textura (silte, argila e areia) objeto de estudo.

Tabela 2 – Proporção das partículas de solo e suas respectivas classificações

	Textura (%)			Classificação
	Silte	Argila	Areia	
T1	7,2	27,2	65,6	Franco argilo arenoso
T2	7,2	72,2	20,6	Muito argiloso
T3	9,7	67,2	23,1	Muito argiloso
T4	12,2	69,7	18,1	Muito argiloso
T5	7,2	57,2	35,6	Argiloso

¹ T1: área com 4 anos de cultivo; T2: área com 17 anos de cultivo; T3: área com 19 anos de cultivo; T4: área com 20 anos de cultivo; T5: mata nativa

Nos diferentes tratamentos há uma variação dos teores de areia e argila, sendo que o tratamento 1 registrou um percentual de areia superior aos demais tratamentos.

Curvas de compactação do solo

Os dados obtidos são semelhantes ao proposto por Machado *et al.*, (2001), conforme observa-se nas figuras 2, 3, 4, 5 e 6, as quais apresentam a densidade máxima do solo (g/cm^3) em relação à umidade do solo (g/g) para os tratamentos 1, 2, 3, 4 e 5 respectivamente.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

AValiação de atributos físicos do solo em diferentes tempos de uso no estado de Mato Grosso
Natalia Vigolo, Ana Carmen Ribeiro Scherner, Felipe Vieira Lopes, Jean Lucas Navarro Fernandez, João Vitor Vidal de Souza,
Samuel Moreira Coelho Ruppim, Carlos Eduardo Cruz Teixeira Zanin

Figura 2 – Curva de compactação do tratamento 1

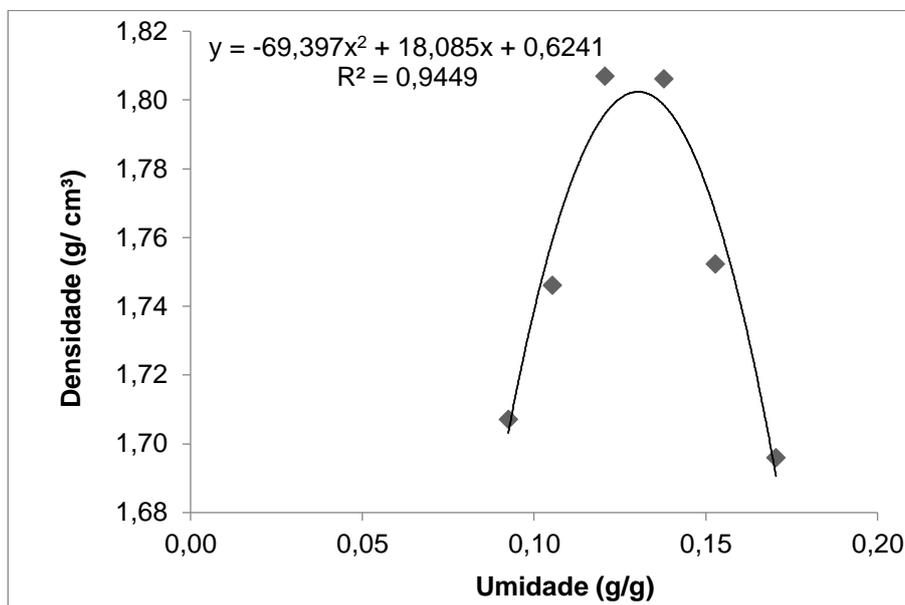
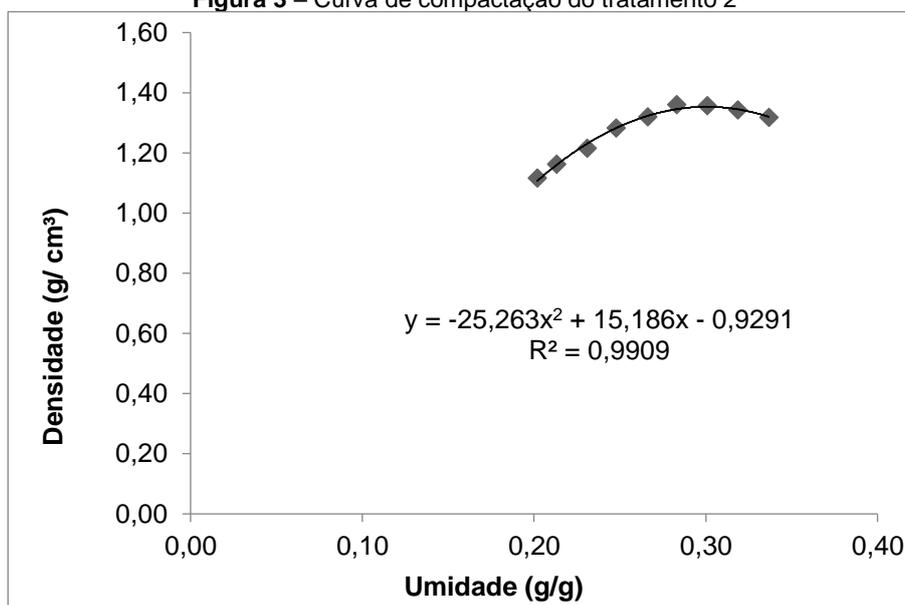


Figura 3 – Curva de compactação do tratamento 2





RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

AValiação de atributos físicos do solo em diferentes tempos de uso no estado de Mato Grosso
Natalia Vigolo, Ana Carmen Ribeiro Scherner, Felipe Vieira Lopes, Jean Lucas Navarro Fernandez, João Vitor Vidal de Souza,
Samuel Moreira Coelho Ruppim, Carlos Eduardo Cruz Texeira Zanin

Figura 4 – Curva de compactação do tratamento 3

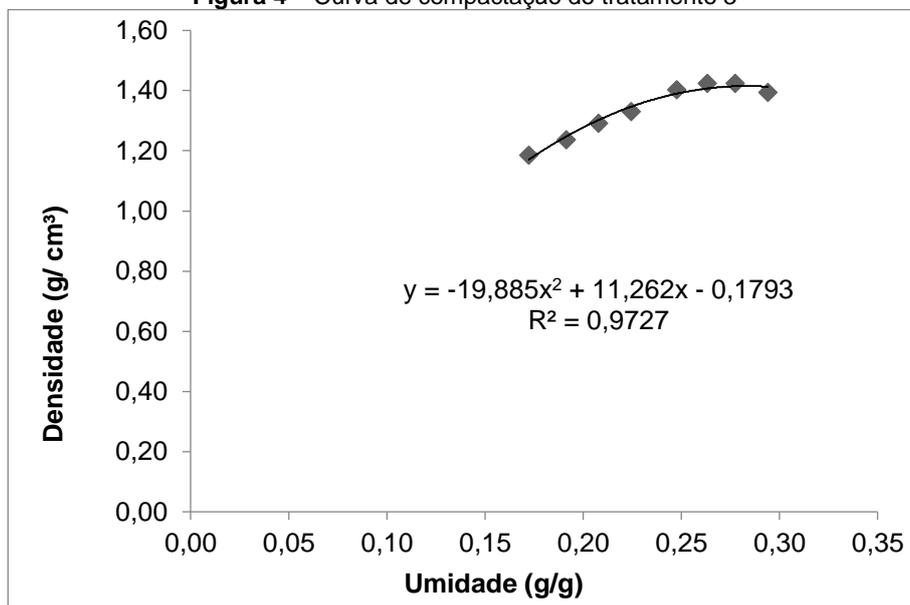
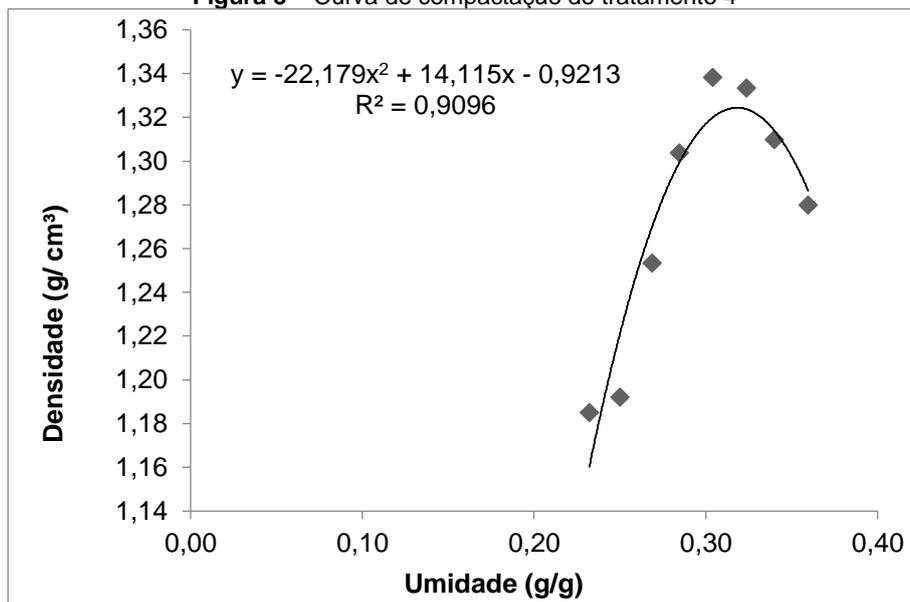


Figura 5 – Curva de compactação do tratamento 4

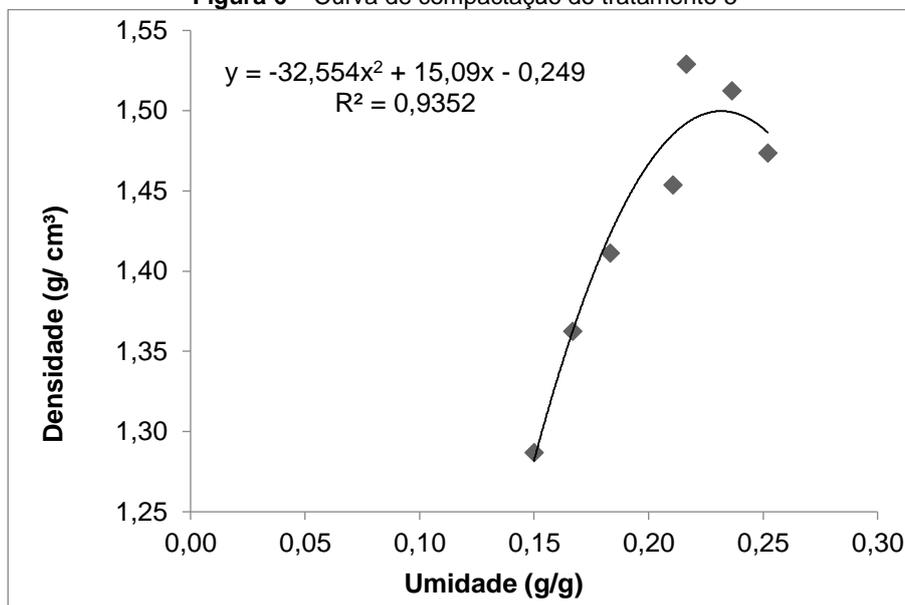




RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

AValiação de atributos físicos do solo em diferentes tempos de uso no estado de Mato Grosso
Natalia Vigolo, Ana Carmen Ribeiro Scherner, Felipe Vieira Lopes, Jean Lucas Navarro Fernandez, João Vitor Vidal de Souza,
Samuel Moreira Coelho Ruppim, Carlos Eduardo Cruz Teixeira Zanin

Figura 6 – Curva de compactação do tratamento 5



No tratamento 1 a densidade máxima do solo foi de $1,81 \text{ g/cm}^3$ quando ele atinge um teor de umidade de $0,13 \text{ g/g}$. Os valores de umidades ótimas de compactação para os demais tratamentos foram maiores, enquanto as densidades máximas para eles foram reduzidas. No tratamento 2 por exemplo, o teor de umidade ótimo é de $0,28 \text{ g/g}$ em uma densidade de $1,36 \text{ g/cm}^3$, para os tratamentos 3 e 4 esses valores foram $0,27 \text{ g/g}$ e $1,42 \text{ g/cm}^3$, $0,30 \text{ g/g}$ e $1,34 \text{ g/cm}^3$, respectivamente. A testemunha teve densidade máxima de $1,53 \text{ g/cm}^3$ em uma umidade ótima de $0,22 \text{ g/g}$.

Densidade do solo

A Tabela 3 registra os valores de densidade do solo nos diferentes tratamentos e em diferentes profundidades. Registra-se que, no tratamento 1 (manejo 4 anos) as densidades do solo nas profundidades analisadas foram aquelas mais significativas do ponto de vista de observações. Os valores correspondentes a cada profundidade advêm de uma média de 5 observações. Esses valores estão dentro das faixas preconizadas por Klein (2014) que, manifesta a sua opinião para solos agrícolas, principalmente em áreas cujo tempo são menores.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

AVALIAÇÃO DE ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO EM DIFERENTES TEMPOS DE USO NO ESTADO DE MATO GROSSO
Natalia Vigolo, Ana Carmen Ribeiro Scherner, Felipe Vieira Lopes, Jean Lucas Navarro Fernandez, João Vitor Vidal de Souza,
Samuel Moreira Coelho Ruppim, Carlos Eduardo Cruz Texeira Zanin

Tabela 3 – Valores de densidade do solo para os tratamentos analisados

	Densidade (Mg/m ³)	
	Prof. 5-10 cm	Prof. 15-20 cm
T1	1,41	1,38
T2	1,02	1,03
T3	1,08	1,07
T4	0,90	1,01
T5	0,97	0,92

Nos demais tratamentos destacam-se os valores encontrados para as duas profundidades analisadas, pois seguem o que foi proposto por Silveira *et al.* (2008), em que a densidade do solo sob plantio direto pode ser reduzida com o tempo, devido, em parte, ao aumento do teor de matéria orgânica na camada superficial, que favoreceria a agregação e melhoraria a qualidade estrutural do solo, o que explicaria os baixos valores de densidade encontrados para os tratamentos 2, 3 e 4.

Macroporosidade do solo

A Tabela 4 apresenta os valores de macroporosidade, microporosidade e porosidade total nos diferentes tratamentos.

Tabela 4 – Valores médios de porosidade expressos em percentual

	Porosidade (%)					
	MA		MI		PT	
	5-10 cm	15-20 cm	5-10 cm	15-20 cm	5-10 cm	15-20 cm
T1	18,07	19,17	28,82	28,90	46,89	48,07
T2	30,49	39,32	31,03	21,89	61,51	61,21
T3	40,34	38,33	18,94	21,31	59,28	59,65
T4	33,34	29,33	32,87	32,46	66,21	61,79
T5	49,76	47,59	13,63	17,80	63,39	65,40

² Ma: macroporosidade, Mi: microporosidade, PT: porosidade total

Os valores de macroporosidade nas camadas de 5-10 e 15-20 cm estão compatíveis com os tratamentos analisados. Observa-se que na relação da densidade e macroporosidade no tratamento 1 existe uma certa coerência, uma vez que a densidade maior reflete na redução da macroporosidade, já que a ocorrência de microporos é favorecida. Isso reflete também para os demais tratamentos.

O tratamento 1 é o que mais se aproxima do valor proposto por Kiehl (1979) quando afirma que um solo ideal é aquele que apresenta 17% de macroporos, enquanto os demais tratamentos, 2, 3, 4 e 5, apresentaram valores acima do considerado ideal.

Além disso, os resultados encontrados para macroporosidade são superiores a 10% em todos os tratamentos analisados, apresentando, segundo Greenlad (1981) condições ideais de aeração para o desenvolvimento das plantas. Da mesma forma, os valores de macroporosidade encontrados,



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

AVALIAÇÃO DE ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO EM DIFERENTES TEMPOS DE USO NO ESTADO DE MATO GROSSO
Natalia Vigolo, Ana Carmen Ribeiro Scherner, Felipe Vieira Lopes, Jean Lucas Navarro Fernandez, João Vitor Vidal de Souza,
Samuel Moreira Coelho Ruppim, Carlos Eduardo Cruz Texeira Zanin

indicam a não degradação do solo para Campos e Alves (2008), que definem como crítico, valores abaixo de 10%.

Microporosidade do solo

Na Tabela 4 é possível observar maior ocorrência de microporos nas duas camadas analisadas do tratamento 4. Esse tratamento representa a área com mais tempo de cultivo, ou seja, onde houve tráfego de máquinas em maior quantidade e intensidade, sugerindo a possibilidade de fraturamento dos agregados maiores em unidades menores. Na mata nativa, onde há ausência de tráfego, foi encontrado menor microporosidade entre os tratamentos, pois os agregados não sofreram alterações.

Para Kiehl (1979), a porosidade de um solo ideal deve apresentar uma proporção de 1/3 macroporos e 2/3 microporos. Nesse sentido, nenhum dos tratamentos analisados atingiram os 2/3 de microporos considerados ideal para cultivo.

Além do mais, em relação à mata nativa, nos demais tratamentos é visto a diminuição da macroporosidade associada ao aumento da microporosidade. Portugal *et al.* (2008) consideram essa informação como um indicador de compactação do solo, e Wendling *et al.* (2003) afirmam que a respiração radicular das plantas é prejudicada quando o solo estiver próximo à capacidade de campo, já que grande proporção dos microporos estará ocupada por água.

Porosidade total do solo

Do ponto de vista das observações feitas sobre porosidade, o tratamento 1 divergiu em porosidade total dos demais tratamentos nas profundidades analisadas. Essa diferença pode ser influência do manejo adotado nos primeiros anos de cultivo dessa área, durante as duas primeiras safras aderiu-se o sistema convencional de plantio e somente nos dois anos seguintes houve transição para o sistema de cultivo mínimo. Esse primeiro método de cultivo é pouco conservacionista, podendo causar a diminuição da porosidade total.

O tratamento 1 é o único que não alcançou o valor de 50% de poros em nenhuma das duas camadas, apesar de se aproximar desse valor. Os demais tratamentos apresentaram valores elevados de porosidade total, no entanto, não é um demonstrativo de que o solo está em condições adequadas para cultivo, uma vez que, os percentuais de macro e microporos devem estar próximos do ideal para o desenvolvimento da planta.

Densidade relativa do solo

Os valores de densidade relativa do solo estão apresentados na Tabela 5. Os resultados encontrados decorrem da relação entre a densidade do solo no campo e a densidade máxima do solo obtida pelo ensaio de Proctor.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR

ISSN 2675-6218

AVALIAÇÃO DE ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO EM DIFERENTES TEMPOS DE USO NO ESTADO DE MATO GROSSO
Natalia Vigolo, Ana Carmen Ribeiro Scherner, Felipe Vieira Lopes, Jean Lucas Navarro Fernandez, João Vitor Vidal de Souza,
Samuel Moreira Coelho Ruppim, Carlos Eduardo Cruz Teixeira Zanin

Tabela 5 – Valores de densidade relativa do solo

	Ds	Dmáx	DR
T1 prof. 1	1,41	1,81	0,78
T1 prof. 2	1,38	1,81	0,76
T2 prof. 1	1,02	1,36	0,75
T2 prof. 2	1,03	1,36	0,76
T3 prof. 1	1,08	1,42	0,76
T3 prof. 2	1,07	1,42	0,75
T4 prof. 1	0,9	1,34	0,67
T4 prof. 2	1,01	1,34	0,75
T5 prof. 1	0,97	1,53	0,63
T5 prof. 2	0,92	1,53	0,60

³ Ds: densidade do solo, Dmáx: densidade máxima, DR: densidade relativa do solo

Observa-se que o tratamento 1 manifestou maior densidade relativa comparado com os demais tratamentos na profundidade 5-10 cm. Os resultados encontrados corroboram o que Klein (2014) aponta em solos argilosos, onde os valores críticos são efetivamente menores.

Na tabela 6 encontram-se os valores de densidade relativa propostos por Klein (2014) em um Latossolo Vermelho. Nota-se que ao aumentar os teores de argila nos solos estudados, houve redução na densidade relativa para todas as condições propostas. Tal fato foi registrado nesse estudo, onde o tratamento cuja composição há predominância de areia, manifestou maior densidade relativa. Por outro lado, o tratamento 4, cuja textura dispõe de maior proporção de argila, manifestou menor densidade relativa na profundidade 5-10 cm entre os tratamentos com utilização agrícola, com exceção da mata nativa.

Tabela 6 – Valores de densidade relativa em função do teor de argila do solo

Teor de argila (%)	DR IHO máximo	Máxima DR no campo	DR crítica RP = 2 Mpa	DR crítica RP = 3 Mpa
32	0,81	0,91	0,98	1,04
45	0,84	0,89	0,92	0,97
56	0,82	0,89	0,95	1,03
65	0,85	0,87	0,88	0,94
77	0,82	0,86	0,89	0,91

Fonte: Klein (2014) ⁴DR: densidade relativa do solo, IHO: intervalo hídrico ótimo, RP: resistência à penetração

Com os valores apresentados, determina-se que o nível de compactação para todos os tratamentos é solto, segundo os valores de referência propostos por Marcolin (2009) na Tabela 7.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

AValiação de atributos físicos do solo em diferentes tempos de uso no estado de Mato Grosso
Natalia Vigolo, Ana Carmen Ribeiro Scherner, Felipe Vieira Lopes, Jean Lucas Navarro Fernandez, João Vitor Vidal de Souza,
Samuel Moreira Coelho Ruppim, Carlos Eduardo Cruz Teixeira Zanin

Tabela 7 – Valores de referência para a densidade relativa

Valor	Nível de compactação	Observação	Fonte
< 0,8	Solto	Valor abaixo do qual o crescimento das plantas é prejudicado pelo excesso de porosidade de aeração e menor volume de água disponível.	Beutler <i>et al.</i> (2005b)
0,80 a 0,90	Não compactado	Faixa de densidade relativa considerada não restritiva ao crescimento das plantas.	Lipiec <i>et al.</i> (1991), Klein (2006) e Reine <i>al.</i> (2008)
0,90 a 0,95	Compactado	Ocorre a restrição com deformações na morfologia das raízes em grau médio.	Reinert <i>et al.</i> (2008)
> 0,95	Muito compactado	Ocorre deformação significativa do sistema radicular, grande engrossamento e desvios no crescimento vertical e concentração na camada mais superficial.	Reinert <i>et al.</i> (2008)

Fonte: Marcolin (2009)

Haja visto que todos os valores de densidade relativa registrados para os tratamentos em estudo foram inferiores a 0,8, define-se que não há compactação para nenhum dos tratamentos analisados, segundo o que foi proposto por Marcolin (2009).

Resistência do solo à penetração

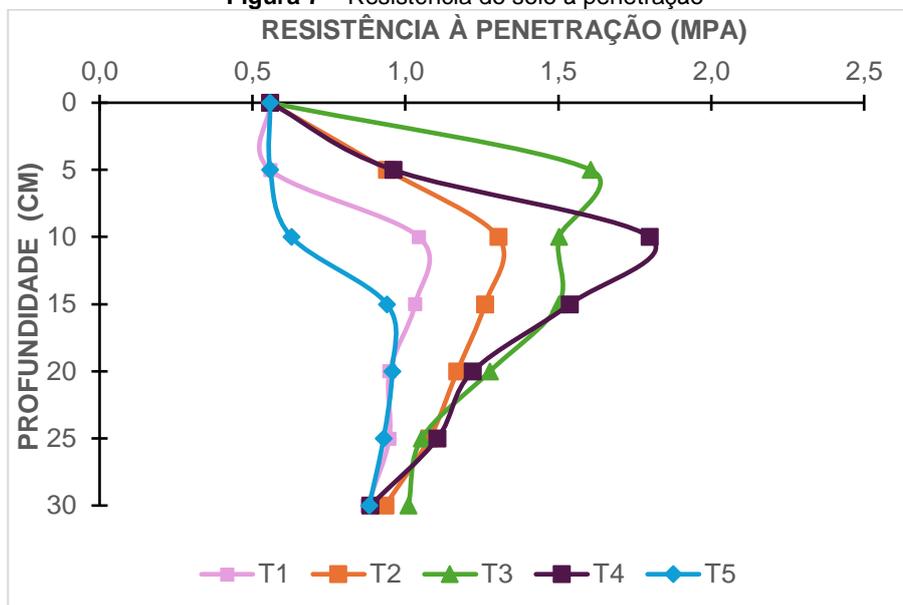
Os dados de resistência do solo a penetração podem ser vistos na figura 7, cujo teores de umidade foram determinados próximo ao limite de friabilidade.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

AValiação de atributos físicos do solo em diferentes tempos de uso no estado de Mato Grosso
Natalia Vigolo, Ana Carmen Ribeiro Scherner, Felipe Vieira Lopes, Jean Lucas Navarro Fernandez, João Vitor Vidal de Souza,
Samuel Moreira Coelho Ruppim, Carlos Eduardo Cruz Texeira Zanin

Figura 7 – Resistência do solo à penetração



A Figura 7 apresenta as curvas de resistência do solo a penetração dos tratamentos executados. Observa-se que os limites de resistência do solo a penetração estão na faixa de 10 cm de profundidade para todos os tratamentos analisados, sendo que o tratamento 4 (20 anos de manejo) foi aquele que apresentou maior valor. Mesmo assim, a resistência analisada não é considerada impeditiva para o desenvolvimento das plantas, já que nenhum valor registrado ficou no intervalo de 2,0 a 2,5 MPa (Taylor *et al.*, 1966; Taylor, 1971).

Pode-se afirmar sobre o ponto de vista de observações a campo que o fator primordial para o registro de dados conforme a Figura 3 advém da relação de um bom teor de umidade na avaliação de resistência do solo. Levando-se em consideração os dados coletados nos diferentes tratamentos, observa-se que o tratamento 5 (mata nativa) foi aquele que registrou os menores valores de resistência do solo, que segundo Gomes *et al.*, (2015) pode ser explicado pela presença de cobertura do solo, favorecendo a umidade, fator esse que expressa influência direta sob a resistência a penetração de um solo, tendendo a reduzir a força de resistência (Imhoff *et al.*, 2002). Além do mais, essa área não sofreu ação antropológica e não teve o uso do solo alterado, justificando a baixa resistência à penetração.

CONSIDERAÇÕES

O tratamento 1 cuja textura é de solo mais arenoso foi aquele que apresentou os maiores valores de densidade do solo e menores teores de macroporosidade.

Os valores de densidade relativa apontam para o tratamento 4 na profundidade 5- 10 cm e o tratamento 5 em ambas as profundidades de estudo, como aqueles que têm menor nível de compactação.

O tratamento 4 (20 anos de manejo) foi aquele que apresentou maior resistência do solo entre os tratamentos estudados.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

AVALIAÇÃO DE ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO EM DIFERENTES TEMPOS DE USO NO ESTADO DE MATO GROSSO
Natalia Vigolo, Ana Carmen Ribeiro Scherner, Felipe Vieira Lopes, Jean Lucas Navarro Fernandez, João Vitor Vidal de Souza,
Samuel Moreira Coelho Ruppim, Carlos Eduardo Cruz Texeira Zanin

REFERÊNCIAS

AITA, C.; GIACOMINI, S. J.; HUBNER, A. P.; CHIAPINOTTO, I. C. FRIES, M. R. Consorciação de plantas de cobertura no outono/inverno antecedendo o milho em plantio direto: Dinâmica do nitrogênio no solo. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 28, p. 739-749, 2004.

ARAÚJO, M. A.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 2, p. 337-345, 2004.

BENGOUGH, A. G.; MULLINS, C. E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. **Journal of Soil Sciences**, v. 41, n. 3, p. 341-358, 1990.

BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J. A.; LEITE, D.; AMARAL, A. J.; ZOLDAN JUNIOR, W. A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 1, p. 155-163, 2004.

BEUTLER, A. N. *et al.* Densidade relativa ótima de latossolos vermelhos para a produtividade de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 843-849, 2005.

BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; VEIGA, M.; REINERT, D. J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtidas no ensaio de Proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 4, p. 605-614, 2006.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento de plantas**. Piracicaba: ESALQ, 1997.

CAMPOS, F. S.; ALVES, M. C. Uso de lodo de esgoto na reestruturação de solo degradado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1389-1397, 2008.

CAVENAGE, A.; MORAES, M. L. T.; ALVES, M. C.; CARVALHO, M. A. C.; FREITAS, M. L. M.; BUZZETI, S. Alterações nas propriedades físicas de um latosso vermelho- escuro sob diferentes culturas. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 23, n. 4, p. 997-1003, 1999.

COSTA, L. M.; JUCKSCH, I.; GJORUP, G. B. Fertilidade e manejo de solos. *In: Curso de especialização por tutoria à distância*. Brasília, DF: ABEAS, 1996. 61 p.

CUNHA, N. R. S.; LIMA, J. E.; GOMES, M. F. M.; BRAGA, M. J. A. Intensidade da exploração agropecuária como indicador da degradação ambiental na região dos cerrados, Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 46, n. 2, p. 291-323, 2008.

DANIEL, L. A.; LUCARELLI, J. R.; CARVALHO, J. F. de. **Efeito do método de preparo do solo na formação de camadas compactadas**. Jaboticabal: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1995. Mimeografado.

DEBIASI, H.; LEVIEN, R.; TREIN, C. R.; CONTE, O.; KAMIMURA, K. M. Produtividade da soja e milho após coberturas de inverno e descompactação mecânica do solo. **Pesquisa agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 6, p. 603-612, 2010.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília: EMBRAPA, 2017. 574p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412p.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

AVALIAÇÃO DE ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO EM DIFERENTES TEMPOS DE USO NO ESTADO DE MATO GROSSO
Natalia Vigolo, Ana Carmen Ribeiro Scherner, Felipe Vieira Lopes, Jean Lucas Navarro Fernandez, João Vitor Vidal de Souza,
Samuel Moreira Coelho Ruppim, Carlos Eduardo Cruz Texeira Zanin

FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G.; BALIEIRO, F. de C.; MOURA, T. P. A. de; DE MENEZES, A. R.; SANTANA, C. I. Características e atributos de Latossolos sob diferentes usos na região Oeste do Estado da Bahia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 9, p. 1457-1465, 2016.

FREITAS, M. C. M. A cultura da soja no Brasil: o crescimento da produção brasileira e o surgimento de uma nova fronteira agrícola. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 7, n. 12, 2011.

FUENTES-LLANILLO, R.; RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; GUIMARÃES, M. F.; FERREIRA, R. R. M. Evolução de propriedades físicas do solo em função dos sistemas de manejo em culturas anuais. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 27, n. 2, p. 205-220, 2006.

GENRO JUNIOR, S. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; ALBUQUERQUE, J. A. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho e produtividade de culturas cultivadas em sucessão e rotação. **Ciência Rural**, v. 39, n. 1, p. 65-73, 2009.

GOMES, R. L. R.; DA SILVA, M. C.; DA COSTA, F. R.; DE LIMA JUNIOR, A. F.; DE OLIVEIRA, I.P.; & DA SILVA, D. B. Propriedades físicas e teor de matéria orgânica do solo sob diferentes coberturas vegetais. **Revista Eletrônica Faculdade Montes Belos**, v. 9, n. 1, 2015.

GREENLAND, D. J. Soil management and soil degradation. **Journal of Soil Science**, London, v. 31, p. 301-322, 1981.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P. & DEXTER, A.R. Factors contributing to the tensile strength and friability of Oxisols. **Soil Science Society of America Journal. Am. J.**, v. 66, p. 1656-1661, 2002.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: relação solo-água-plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979.

KLEIN, V. A. Densidade Relativa – um indicador de qualidade física de um Latossolo Vermelho. **Ciências Agroveterinárias**, v. 5, p. 26-32, 2006.

KLEIN, Vilson Antonio. **Física do solo**. 3. ed. Passo Fundo: EDIUPF, 2014. p. 263.

KOPPI, A. J.; DOUGLAS, J. T. A rapid, inexpensive and quantitative procedure for assessing soil structure with respect to cropping. **Soil Use and Management**, Oxford, v. 7, n. 1, p. 52-56, mar. 1991.

LIMA, C. L. R. de; PILLON, C. N.; LIMA, A. C. R. de. **Qualidade física do solo: indicadores quantitativos**. Embrapa. Pelotas, 2007. 27 p.

LIPIEC, J. *et al.* Soil physical properties and growth of spring barley as related to the degree of compactness of two soils. **Soil & Tillage Res.**, v. 19, p. 307-317, 1991.

MACHADO, S. L.; MACHADO, M. F. C. **Mecânica dos solos**. Salvador: UFBA, 2001.

MANZATTO, C. V.; FREITAS JUNIOR, E.; PERES, J. R. R. **Uso agrícola dos solos brasileiros**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. 174p.

MARCHÃO, R. L.; VILELA, L.; PALUDO, A. L.; JUNIOR, R. G. **Impacto do pisoteio animal na compactação do solo sob integração lavoura-pecuária no Oeste Baiano**. Brasília: Embrapa Cerrados-Comunicado Técnico (INFOTECA-E), 2009.

MARCOLIN, C. D. **Indicadores da qualidade física de solos sob plantio direto obtidos por funções de pedotransferência**. 2009. 183f. Tese (Doutorado em Agronomia) – FAMV-UPF, Passo Fundo, 2009.

MARCOLIN, C. D. **Propriedades físicas de um Nitossolo e Latossolos Argilosos sob plantio direto**. 2006. 97f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) FAMV-UPF, Passo Fundo, 2006.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

AVLIAÇÃO DE ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO EM DIFERENTES TEMPOS DE USO NO ESTADO DE MATO GROSSO
Natalia Vigolo, Ana Carmen Ribeiro Scherner, Felipe Vieira Lopes, Jean Lucas Navarro Fernandez, João Vitor Vidal de Souza,
Samuel Moreira Coelho Ruppim, Carlos Eduardo Cruz Teixeira Zanin

MELO FILHO, J. D.; SOUZA, A. L. V.; SOUZA, L. D. S. Determinação do índice de qualidade subsuperficial em um Latossolo Amarelo Coeso dos Tabuleiros Costeiros, sob floresta natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1599- 1608, 2007.

PORTUGAL, A. F. *et al.* Atributos químicos e físicos de um cambissolo háplico Tb distrófico sob diferentes usos na Zona da Mata Mineira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 249-258, 2008.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; SUZUKI, L. E. A. S.; HORN, R. **Mecânica do solo**. [S. l.: s. n.], 2010.

REINERT, D. J.; ALBUQUERQUE, J. A.; REICHERT, J. M.; AITA, C.; ANDRADA, M. M. C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1805-1816, 2008.

SALES, R. P.; PORTUGAL, A. F.; MOREIRA, J. A. A.; KONDO, M. K.; PEGORARO, R. F. Physical quality of a Latosol under no-tillage and conventional tillage in the semi-arid region. **Revista Ciência Agronômica**, v. 47, n. 3, p. 429-438, 2016.

SANCHEZ, Emmanuel. **Propriedades físicas do solo e produtividade de soja em sucessão a plantas de cobertura de inverno**. 2012. 48f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual do Centro-Oeste, 2012.

SANO, E. E.; ROBERTO ROSA, R.; BRITO, J. L. S.; FERREIRA, L. G. Mapeamento semidetalhado do uso da terra do Bioma Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 1, p. 153-156, 2008.

SANTOS, D. P.; SANTOS, G. G.; SANTOS, I. L.; SCHOSSLER, T. R.; NIVA, C. C.; MARCHAO, R.L. Caracterização da macrofauna edáfica em sistemas de produção de grãos no Sudoeste do Piauí. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 9, p. 1466-1475, 2016.

SECCO, D.; ROS, C. O.; SECCO, J. K.; FIORIN, J. E. Atributos físicos e produtividade de culturas em um Latossolo Vermelho argiloso sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 3, p. 407-414, 2005.

SILVEIRA, P. M.; STONE, L. F.; ALVES JÚNIOR, J.; SILVA, J. G. Efeitos do manejo do solo sob plantio direto e de culturas na densidade e porosidade de um Latossolo. **Bioscience Journal**, v. 24, n. 3, p. 53-59, 2008.

TAYLOR, H. M. Effect of soil strength on seedling emergence, root growth and crop yield. *In*: BARNES, K. K. (Org.). **Compaction of agricultural soils**. Madison: American Society of Agricultural Engineers, 1971. p. 292-305. (ASAE Monograph)

TAYLOR, H. M.; ROBERSON, G. M.; PARKER, J. J. Soil strength-root penetration relations for medium-to-coarse-textured soil materials. **Soil Sci.**, v. 102, p. 8-22, 1966.

VOLPE, E.; MARCHETTI, M. E.; MACEDO, M. C. M.; ROSA JUNIOR, E. J. Renovação de Pastagem degradada com calagem, adubação e leguminosa consorciada em Neossolo Quartzarênico. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá-PR, v. 30, n. 1, p. 131-138, 2008.

WATANABE, S. H.; TORMENA, S. A.; ARAÚJO, M. A. Propriedades físicas de um latossolo vermelho distrófico, influenciadas por sistemas de preparo do solo utilizados para implantação da cultura da mandioca. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 24, n. 5, p. 1255-1264, 2002.

WENDLING, B. *et al.* Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, p. 487-494, 2003.