

RESISTÊNCIA MECÂNICA DO SOLO À PENETRAÇÃO COM APLICAÇÃO DE DOIS EQUIPAMENTOS EM SISTEMAS DE USO E MANEJO DO SOLO NO TOCANTINS

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.2182509099>

Osvaldo José Ferreira Junior

Heloisa Donizete da Silva

José Avelino Cardoso

Kellem Ângela Oliveira de Sousa

Louis Antoniel Joseph

Luan Ferraz de Queiroz

Maykon Rodrigo Gomes de Barros

Rodrigo José da Silva

Igor Ricardo Barbosa Teixeira

Saulo de Oliveira Lima

Jonas Ferreira Nunes

Weder Ferreira dos Santos

RESUMO: O Cerrado tem seu território majoritariamente ocupado por atividades agropecuárias, sendo que a determinação da compactação do solo é relevante importância para se monitorar qual sistema de uso ou manejo está contribuindo para o aumento da compactação. Esta, pode ser mensurada por dois equipamentos mais comuns para aferição, o penetrômetro de impacto e eletrônico. Desse modo, o objetivo deste trabalho foi avaliar a resistência mecânica do solo à penetração

em diferentes sistemas de uso e manejo do solo na região sul do Tocantins com o auxílio dos penetrômetros de impacto e eletrônico. O experimento foi conduzido na Fazenda Experimental da Universidade Federal do Tocantins, Campus de Gurupi. Foram realizadas leituras em 4 profundidades: 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm e 30-40 cm utilizando os penetrômetros de impacto e eletrônico em 4 sistemas de uso do solo: pastagem degradada, pastagem recuperada, soja consorciada com forrageira Mombaça e área de monocultivo de eucalipto. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado com 4 repetições, no esquema fatorial duplo. Valores mais elevados de RMSP foram observados para a pastagem degradada, entre 0-10 e 10-20 cm, e para eucalipto nas camadas subsuperficiais avaliadas (20-30 e 30-40 cm), para ambos os equipamentos. O penetrômetro de impacto mensurou valores superiores (Mpa) comparado ao penetrômetro eletrônico, na maioria dos sistemas de uso e manejo estudadas, nas diferentes profundidades. Houve alta correlação ($r=0,945$) entre os valores obtidos pelos dois equipamentos, demonstrando confiabilidade entre os métodos.

PALAVRAS CHAVE: Sistemas de produção integrados; Degradação; Compactação; Manejo e conservação.

MECHANICAL RESISTANCE OF SOIL TO PENETRATION WITH APPLICATION OF TWO EQUIPMENT IN SOIL USE AND MANAGEMENT SYSTEMS IN TOCANTINS

ABSTRACT : The Cerrado's territory is mostly occupied by agricultural activities, and determining soil compaction is of significant importance for monitoring which use or management system is contributing to increased compaction. This can be measured by two of the most common measuring devices: the impact penetrometer and the electronic penetrometer. Therefore, the objective of this study was to evaluate soil mechanical resistance to penetration under different land use and management systems in the southern region of Tocantins using impact and electronic penetrometers. The experiment was conducted at the Experimental Farm of the Federal University of Tocantins, Gurupi Campus. Readings were taken at four depths: 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, and 30-40 cm using impact and electronic penetrometers in four land use systems: degraded pasture, recovered pasture, soybean intercropped with Mombaça forage, and eucalyptus monoculture. The experimental design was completely randomized with four replicates, in a double factorial arrangement. Higher RMSP values were observed for degraded pasture, between 0-10 and 10-20 cm, and for eucalyptus in the subsurface layers evaluated (20-30 and 30-40 cm), for both equipment. The impact penetrometer measured higher values (Mpa) compared to the electronic penetrometer, in most of the use

and management systems studied, at different depths. There was a high correlation ($r=0.945$) between the values obtained by the two devices, demonstrating reliability between the methods.

KEYWORDS: Integrated production systems; Degradation; Compaction; Management and conservation.

INTRODUÇÃO

Correspondendo a 22% do território nacional e sendo a segunda maior região biogeográfica da América do Sul, o Cerrado tem seu território majoritariamente ocupado por atividades agropecuárias. A distribuição tem como a pecuária, representada pelas áreas de pastagens, nativas ou plantadas, a maior representação no senário rural (21,2% da ocupação), seguida pela agricultura anual e perene (7,8%), e pequena fração destinada a silvicultura, 1,2%. (EMBRAPA ,2018).

A atividade pecuária, por sua vez, se consolidou devido a substituição de pastagens nativas por pastagens cultivadas, no entanto, foram estabelecidas em solos ácidos e com baixa fertilidade, de forma que, o processo de degradação dessas áreas ocorreu de forma acelerada em decorrência, principalmente, do manejo inadequado dos animais e da baixa reposição de nutrientes (BORGHI et al., 2018). O resultado é a estagnação da produção em 2 arrobas/ha/ano, enquanto que em pastagens bem manejadas, pode ser alcançado um potencial produtivo de até 16 arrobas/ha/ano (TORRES; ASSIS; LOSS, 2018).

O fato traz à tona uma ótima estratégia para o agronegócio, que visa a intensificação da atividade pecuária, de modo a aumentar a produtividade por unidade de área, e/ou a ocupação das áreas pela atividade agrícola, sem a necessidade de aberturas de áreas. Possivelmente, a nova fronteira agrícola brasileira acorrerá nas grandes áreas de pastagem com algum ou nenhum grau de degradação (CARNEIRO FILHO; COSTA, 2016).

Visando a otimização de recursos e a redução de impactos ambientais, os sistemas de produção integrada combinam diversas práticas agrícolas e pecuárias. Bonetti ar al. (2017) ressalta que o objetivo é conceber sistemas mais sustentáveis ao promover uma eficiência superior no uso dos recursos naturais, gerando sinergias que beneficiam tanto o ambiente quanto a produtividade. (TORRES et al., 2013).

Fatores como o sistema de preparo do solo (MAZURANA et al., 2011), a intensidade do tráfego de máquinas e implementos (ABDALLA et al., 2018), o efeito do pisoteio animal (TORRES et al., 2013), as práticas inadequadas de manejo o (HEBB et al., 2017) e alteração nos teores de carbono orgânico (KAMPF; CURI, 2012) podem acarretar mudanças nas propriedades físicas e morfológicas do solo, como no arranjo das partículas, resultando em variação da resistência mecânica à penetração (STEFANOSKI et al., 2013).

De acordo com Oliveira et al. (2014), determinadas práticas de manejo do solo podem resultar na degradação dos sistemas agrícolas em médio e longo prazo, sendo que a compactação do solo é atualmente um dos problemas enfrentados de maior relevância em diversas regiões (OLIVEIRA et al., 2010; OHLAND et al., 2014). Como forma de verificar a existência de camadas compactadas, usa-se o penetrômetro que é o instrumento no qual, por meio do valor da resistência do solo à penetração, mede a resistência física que o solo oferece a algo que tenta se mover através dele, como uma raiz em crescimento ou uma ferramenta de cultivo (ROBOREDO et al., 2010; BEUTLER et al., 2007).

Para Stolf et al., (2014), existem dois principais grupos de penetrômetros, o do tipo estático e o do tipo dinâmico. São denominados em função do princípio de penetração, no primeiro o conjunto é pressionado contra o solo, e a resistência à penetração é registrada em um dinamômetro. Já no segundo utiliza-se a mesma haste, que penetra no solo em decorrência do impacto de um peso que cai em queda livre de uma altura constante (STOLF, 1991).

Com relação a variedade de penetrômetros, podem trazer consigo diferenças com relação aos resultados obtidos, sendo influenciados principalmente pela área e projeção da ponteira (ASABE, 2006), bem como pela velocidade de penetração (MOLIN et al., 2012). Alguns estudos demonstram a existência de variação nas informações dos equipamentos em função das características dos mesmos. Roboredo et al. (2010), encontraram diferença significativa de resistência mecânica à penetração entre penetrômetros eletrônicos e de impacto, destacando que o equipamento de impacto apresentou confiabilidade de 91% com a densidade do solo, sendo superior ao penetrômetro eletrônico (42%) em relação a mesma variável.

Diante do exposto, a determinação da compactação e escolha do equipamento é fundamental em estudos científicos de modo a contribuir para os estudos pedológicos e orientação para sistemas de manejo. Os diferentes sistemas de uso e manejo do solo devem objetivar a diminuição das perturbações do ambiente, contribuindo ao desenvolvimento das culturas a um nível sustentável. Sendo assim, o objetivo do presente trabalho foi avaliar a resistência mecânica do solo à penetração em diferentes sistemas de uso e manejo do solo na região sul do Tocantins com o auxílio dos penetrômetros de impacto e eletrônico.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado na fazenda experimental da Universidade Federal do Tocantins (UFT), Campus Universitário de Gurupi, localizado na região sul do Estado do Tocantins, localizada nas coordenadas geográficas 11°46'25"S e 49°02'54"W, a 280 metros de altitude e em solo de textura média (Tabela 1). O clima da região é do

tipo savana tropical, classificado como Aw (Megatérmico) por Köppen (1948), com chuvas concentradas no verão e seca no inverno. A média anual de precipitação é de 1300 mm, e as temperaturas anuais extremas registradas são de 15,2 °C (mínima) e 30,4 °C (máxima).

SUS	P ²	K ²	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	V%
SUS	-----mg dm ⁻³ -----		(cmol _c dm ⁻³)-----							
PA-D	1,40	13,60	0,04	0,76	0,31	0,19	3,36	1,11	4,47	24,80
PA-R	1,39	14,75	0,04	1,5	0,69	0,09	2,20	2,23	4,43	50,28
EU	1,51	9,65	0,02	1,65	0,63	0,19	3,65	2,31	5,96	38,72
SO-MOM	10,3	35,59	0,09	1,97	0,46	0,14	2,85	2,52	5,37	46,90
Areia										
SUS	-----						g Kg ⁻¹	-----		
PA-D	686						101	213		
PA-R	679						106	215		
EU	684						102	214		
SO-MOM	690						100	210		

(1): CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹; (2): Extrator Mehlich. Fonte: autores, 2022.

Tabela 1. Análise química e granulométrica do solo nos sistemas de uso e manejo do solo de pastagem degradada (PA-D), pastagem recuperada (PA-R), monocultivo de eucalipto (EU) e rotação de culturas soja-mombaça (SO-MOM) na profundidade de 0-40 cm. Fazenda experimental da Universidade Federal do Tocantins, Gurupi- TO, 2022.

Foram selecionados quatro sistemas de uso e manejo do solo. As áreas de pastagem foram implantadas a mais de 15 anos com o capim *Andropogon gayanus*, na qual a pastagem degradada (PA-D) apresenta solo descoberto e alta incidência de plantas infestantes (folhas largas e estreitas), o que evidencia o grau de degradação; a taxa de lotação situa-se entre 2 a 4 UA ha⁻¹, a depender da época do ano, com pastejo contínuo. Na pastagem recuperada (PA-R), foi aplicado cerca de 1 tonelada ha⁻¹ de calcário calcítico em superfície e foi semeado superficialmente com sementes colhidas em propriedades vizinhas restaurando a área descoberta, sendo adotada baixa lotação (aproximadamente 1 UA ha⁻¹) durante todo o ano.

O eucalipto (*Eucalyptus Urophylla*) (clone L144) foi implantado em novembro de 2017, inicialmente aplicando-se 2 toneladas ha⁻¹, seguida de incorporação na área com grade de 32 polegadas, com espaçamento de 2 m (entre plantas) e 3 m (entre linhas), os tratos culturais e manejos foram feitos quando necessários. Já a área com a cultura da soja (SO-MOM), foi implantada em 2012, na qual se trata

de um experimento de longa duração, em que todas as safras foram realizadas o estabelecimento de uma planta de cobertura, como o cv. Mombaça (*M. maximus*) em sobressemeadura (FERREIRA JUNIOR et al., 2025), realizando todos os tratos culturas necessários de controle de pragas e nutricionais (SOUZA; LOBATO, 2004) (Figura 1).

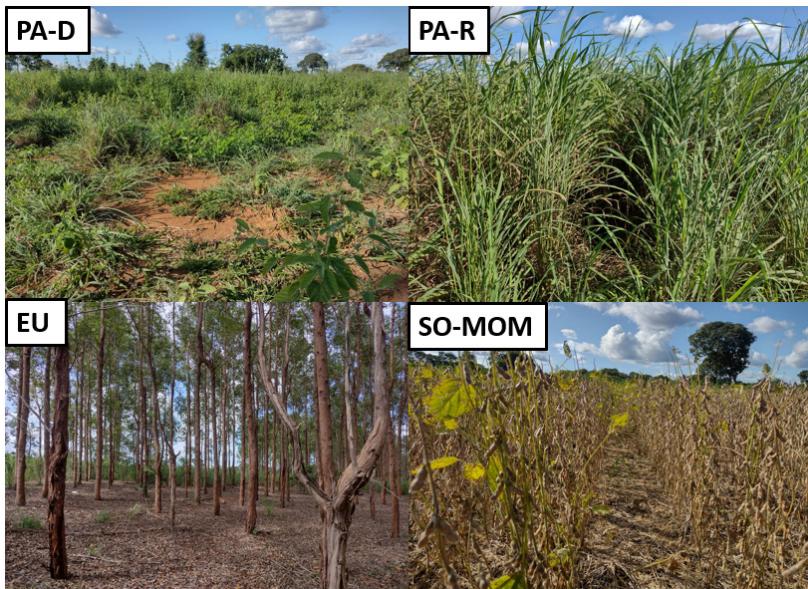


Figura 1. Sistemas de uso e manejo do solo de pastagem degradada (PA-D), pastagem recuperada (PA-R), monocultivo de eucalipto (EU) e rotação de culturas soja-mombaça (SO-MOM). Fazenda Experimental da UFT, Gurupi – TO, 2022.

O ensaio foi conduzido em delineamento inteiramente casualizados (DIC) em esquema fatorial duplo, com quatro repetições, sendo que cada repetição correspondeu a uma área de 25 m² (5 x 5 m) nos sistemas de uso e manejo do solo. O primeiro fator corresponde aos quatro sistemas de uso e manejo do solo e o segundo fator à dois métodos de mensuração da resistência mecânica à penetração (penetrômetro de impacto e eletrônico). Em cada repetição foram feitas cinco leituras, distribuídas aleatoriamente dentro da área de estudo, evitando área de projeção de copa de árvores, resíduos animais e formigueiros, procedendo com a média da unidade experimental posteriormente.

As leituras foram realizadas ao final de março de 2022 nas profundidades de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-40 cm utilizando dois equipamentos para mensurar a resistência mecânica do solo a penetração (RMSP). Foi utilizado o penetrômetro eletrônico, modelo penetroLOG (modelo Falker) e um penetrômetro de Impacto,

modelo IAA/ Planalsucar-Stolf (Figura 2), este aparelho de medida da resistência do solo é do tipo dinâmico, cuja penetração ocorre por impacto (STOLF et al., 2014). Além também da umidade gravimétrica do solo nas mesmas profundidades, por meio do método clássico de pesagem (TEIXEIRA et al. 2017).

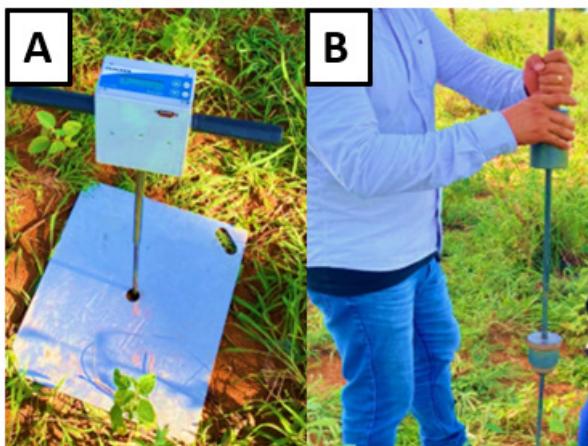


Figura 2. Penetrômetro eletrônico (A) (modelo Falker) e Penetrômetro de mecânico de impacto (B) (modelo IAA/ Planalsucar-Stolf).

A transformação dos valores da penetração da haste do aparelho no solo (cm/impacto) em resistência à penetração (MPa) foi obtida pela fórmula dos “holandeses”, segundo Stolf (1991), a seguir:

$$R(kgf\ cm^{-2}) = \frac{(Mg + mg) + \frac{M}{M+m} * Mg * h/x}{A}$$

Em que R é a resistência à penetração em $kgf\ cm^{-2}$ ($kgf\ cm^{-2} * 0,098 = MPa$), M é a massa do embolo (4 kg), Mg corresponde a 4 kgf, m é a massa do aparelho sem êmbolo (3,2 kg), mg corresponde a 3,2 kgf, h é a altura de queda do êmbolo (0,4 m), x é a penetração da haste do aparelho (cm/impacto), A é a área do cone ($1,29\ cm^2$) e g é a aceleração da gravidade.

A resistência à penetração com o penetrômetro estático foi determinada utilizando cone com área de $3,80$ e $1,13\ cm^2$, respectivamente. O valor obtido no relógio de leitura foi transformado em kgf pela equação de calibração do aparelho, a seguir:

$$R(\text{kgf}) = 1,0444 + 0,2998y$$

Em que R é a resistência à penetração em kgf ((kgf/área do cone)*0,098= MPa) e y é a leitura no relógio (mm).

Os dados foram submetidos à análise de variância a 5% de probabilidade pelo teste F, levando-se em consideração os efeitos dos sistemas de uso e manejo do solo e tipo de equipamento. Quando significativo, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($\alpha=0,05$) e correlação de Pearson utilizando os programas computacionais SAS (SCHLOTZHAVER e LITTELL, 1997) e R Studio (Pacote ExpDes.Pt).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os tratamentos apresentaram diferenças estatísticas nas camadas de solo estudadas para RMSP e numérica para umidade gravimétrica do solo. O tratamento PA-R obteve maiores valores de umidade gravimétrica na camada de 0-10 cm (13,8%) e valores semelhante aos demais sistemas de uso e manejo nas camadas de 0-10 e 10-20 cm. Em síntese, a PA-R, PA-D e EU apresentaram oscilações no conteúdo de umidade a depender da profundidade, ora aumentando e reduzindo, diferentemente da SO-MOM, na qual a umidade aumenta gradativamente conforme a profundidade aumenta (Figura 3).

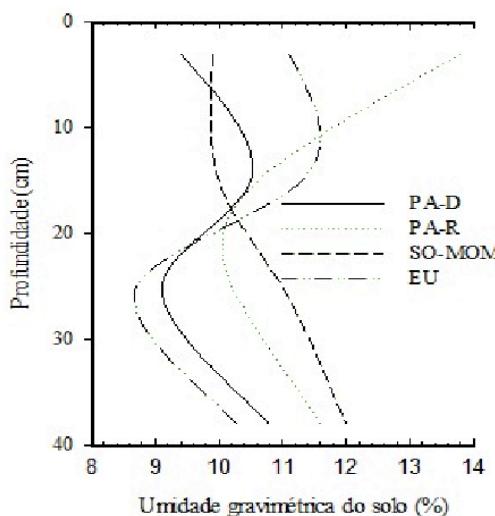


Figura 3. Umidade gravimétrica do solo (U%) nos sistemas de uso e manejo do solo de pastagem degradada (PA-D), pastagem recuperada (PA-R), monocultivo de eucalipto (EU) e sobresemeadura soja-mombaça (SO-MOM). Fazenda Experimental da UFT, Gurupi – TO, 2022.

A área com EU apresentou o menor teor de umidade nas camadas mais profundas (Figura 3) o que pode ter contribuído para a maior RMSP (Figura 4 A e B). Isto ocorre porque as espécies florestais podem reduzir rapidamente a umidade do solo com o efeito da alta capacidade de absorção de água do solo, principalmente em solos que possuem baixa capacidade de armazenamento de água (AGUIAR, 2008). Já a PA-D apresentou a menor umidade do solo na camada mais superficial (0-10 cm), enquanto a PA-R possui o maior teor de água no solo na camada superficial (Figura 3) o que pode ter influenciado nos maiores e menores valores de RMSP, respectivamente, nessas áreas RMSP (FERNANDES et al., 2020). Nessa camada, os valores mais altos de RMSP foram observados para PA-D com 3,51 e 2,60 Mpa nos penetrômetros de impacto ($p<0,001$) e eletrônico ($p<0,001$), respectivamente (Figura 4 A e B).

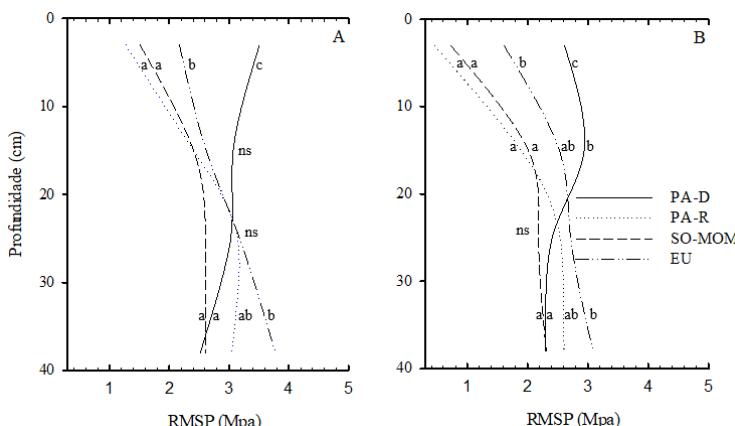


Figura 4. Resistência mecânica do solo à penetração (RMSP) mensurada por penetrômetro de impacto (A) e penetrômetro eletrônico (B) em sistemas de uso e manejo do solo de pastagem degradada (PA-D), pastagem recuperada (PA-R), monocultivo de eucalipto (EU) e sobressemeadura soja-mombaça (SO-MOM). Fazenda Experimental da UFT, Gurupi – TO, 2022. Médias seguidas por letras diferentes, na mesma profundidade, diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (5%). ns=não significativo pelo teste de Tukey (5%).

Além disso, foi constatado menores valores de RMSP para PA-R e SO-MOM, na camada superficial (0-10 cm), possivelmente em virtude do menor efeito do pisoteio devido a menor taxa de lotação (TORRES et al., 2013) e da presença de uma gramínea forrageira com sistema desenvolvido em superfície (SILVA et al., 2020), respectivamente. No entanto, estatisticamente, o penetrômetro de impacto ($p=0,172$) (Figura 4A) não foi tão sensível para detectar o adensamento na profundidade 0-20 cm, quanto o eletrônico ($p=0,004$) que aferiu valores abaixo de 0,5 Mpa para PA-R e SO-MOM (Figura 4 B). Na profundidade de 20-30 cm não foram observadas diferenças significativas entre os sistemas de uso e manejo estudados para os equipamentos eletrônico ($p=0,262$) e de impacto ($p=0,100$).

Pastagens degradadas são caracterizadas pela perda inicial de vegetação devido ao manejo inadequado e taxa de lotação animal acima da suportada pelo pasto que resulta em exposição gradual do solo (DIAS-FILHO; LOPES, 2019), e compactação das camadas mais superficiais do solo pelo pisoteio e exposição às gotas de chuva que podem agravar o processo de degradação do solo através da formação de crostas decorrentes da desagregação das partículas do solo que reorientam-se e acabam por entupir os poros dificultando a percolação de água e favorecendo o escorramento superficial que acarreta em processos de erosão, perda de solo e da fertilidade (BADORRECK et al., 2013).

Esta posição é explicada pela grande capacidade das gramíneas em ocupar a superfície do solo e gerar acúmulo de carbono abaixo do solo (raízes) que resulta em descompactação de camadas adensadas pelas raízes agressivas as quais parecem ajustar o seu diâmetro para preencher os espaços porosos menores em busca de água e nutrientes (HUOT et al., 2020). De fato, pastagens bem manejadas (PA-R), ou seja, respeitando-se o limite de intensidade de desfolha de até 50% da altura do dossel, possuem boa recuperação do sistema radicular em sistemas de pastejo intermitente o que favorece a descompactação do solo e redução da RMPS durante o período de crescimento e recuperação do dossel das gramíneas, independentemente do nível de intensificação (SOUZA et al., 2021).

A cobertura do solo age como proteção contra os impactos das gotas de chuva e também gera maior acúmulo de carbono que melhoram a retenção de água, a qual afeta fortemente a RMPS (GABRIEL et al., 2021). Com a menor RMPS, há também um aumento no intervalo hídrico ótimo (IHO), o que é benéfico para as plantas que ficam propensas ao crescimento quando o teor de água está dentro do IHO e, de forma contrária, o aumento na RMPS pode causar uma restrição na absorção de água, o que diminui o crescimento e a produtividade das plantas (COLOMBO et al., 2017).

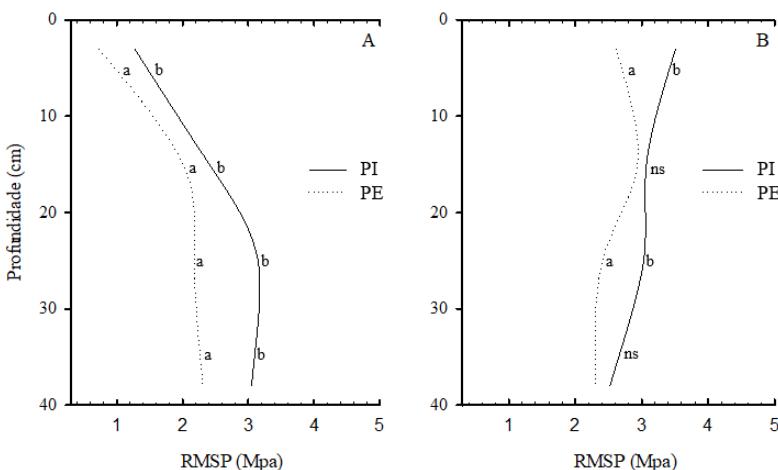
De maneira geral, para o penetrômetro de impacto (Figura 4 A), o teste de média demonstrou que o cultivo de soja consorciada com a forrageira Mombaça (SO-MOM) e obteve menores média de RMSP nas profundidades de 0-10 ($p<0,001$) e 30-40 cm ($p=0,002$) (1,51 e 2,60 Mpa, respectivamente), todavia apresentando igualdade estatística a PA-R em 0-10 cm (1,46 Mpa) e a PA-D de 30-40 cm (2,52 Mpa).

Já para o penetrômetro eletrônico (Figura 4 B), na camada superficial (0-10 cm) ($p<0,001$), a PA-R (0,40 Mpa) e SO-MOM (0,72 Mpa) apresentaram as menores médias, sendo que, a mesma tendência foi observada na profundidade de 10-20 cm ($p=0,004$), na qual, além da PA-R (1,89 Mpa) e SO-MOM (2,01 Mpa), o EU (2,43 Mpa) também demonstrou igualdade estatística. Ademais, na profundidade de 30-40 cm ($p<0,001$), houve uma redução dos valores de RMSP na PA-D (2,29 Mpa), que apresentou médias equivalentes estatisticamente à SO-MOM (2,30 Mpa) e PA-R (2,60 Mpa).

Os menores valores em Mpa de RMSP na SO-MOM ocorre, provavelmente, em virtude da presença de uma planta forrageira com o sistema radicular mais robusto e eficiente (cv. Mombaça), o que promove a formação de galerias e maior porosidade ao solo, reduzindo a taxa compactação das partículas. Por outro lado, na PA-D, o capim *Andropogon gayanus* possui raízes menos agressivas o que dificulta a presença de poros (HUOT et al., 2020), além disso, o manejo inadequado dos animais, pela alta lotação, ocasionou a morte de algumas plantas e ocorrência de solo descoberto, o que pode ter agravado a interrupção dos poros (aumento da densidade, compactação) (DIAS-FILHO; LOPES, 2019; BADORRECK et al., 2013).

No comparativo entre os equipamentos foi observado que em todos os sistemas de uso e manejo do solo houve diferença significativa em, pelo menos, uma das profundidades estudadas. Ressalta-se que em quase todas as áreas o penetrômetro de impacto (PI) apresentou valores de RMSP, em MPa, superiores ao penetrômetro eletrônico (PE) (Figura 5), corroborando com os resultados de Beutler et al., (2007) e Lima et al., (2013) que afirmam que apesar das distintas formas de funcionamento dos equipamentos, ambos são eficientes no monitoramento da compactação do solo. Apesar de mecanismos de funcionamentos distintos, entre os equipamentos, ambos exercem a mesma função, sendo necessário o conhecimento de suas características para o estudo da RMSP (Lima et al., 2013).

Todavia, não há um consenso sobre o limiar do valor da RMSP, sabe-se que valores acima de 2,0 MPa começam a prejudicar o bom desenvolvimento radicular da maioria das culturas (TAYLOR et al., 1966) e entre 2,0 a 3,0 para a cultura da soja (BEUTLER et al., 2006).



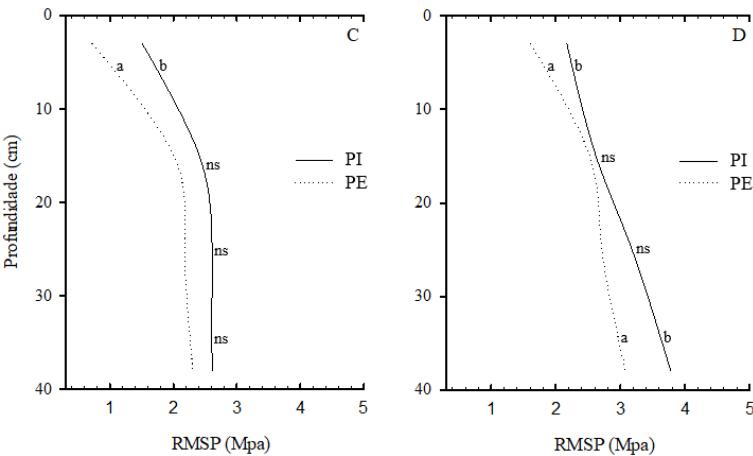


Figura 5. Resistência mecânica do solo à penetração (RMSP) em sistemas de uso e manejo do solo de pastagem recuperada (PA-R) (A), pastagem degradada (PA-D) (B), sobressemente soja-mombaça (SO-MOM) (C) e eucalipto (EU) (D), mensurada com penetrômetro de impacto (PI) e penetrômetro eletrônico (PE). Fazenda Experimental da UFT, Gurupi – TO, 2022. Médias seguidas por letras diferentes, na mesma profundidade, diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (5%). ns=não significativo pelo teste de Tukey (5%).

Na PA-R (Figura 5-A), em todas as profundidades, o PE obteve médias de RMSP menores que o PI, confirmado pelo teste de média. Ficando essa diferença mais acentuada na camada subsuperficial (20-30 cm), em que houve uma amplitude de pouco mais de 1,0 Mpa. Todavia, no consórcio SO-MOM (Figura 5-C), apenas em superfície (0-10 cm) houve diferença significativa entre o PE (0,72 Mpa) e PI (1,51 Mpa), apresentando homogeneidade de médias no restante do perfil analisado. Já para a PA-D (Figura 5-B), notou-se melhores médias para o PE nas camadas de 0-10 cm (2,62 Mpa) e 20-30 cm (2,41 Mpa); e de forma semelhante, no sistema de uso de eucalipto (Figura 5-D), na profundidade 0-10 cm (1,61 Mpa) e 30-40 cm (3,08 Mpa), em que também o PE apresentou valores menores, comparado ao PI.

Importante destacar que os resultados apresentados corroboram com o estudo de Beutler et al. (2007), que comparando três penetrômetros, na avaliação da compactação de um Latossolo, observaram valores superiores para o penetrômetro de impacto, todavia, constataram também a eficiência dos demais equipamentos estudados (anel dinamométrico e penetrômetro eletrônico). Vale ressaltar também que o PI, possivelmente, apresenta ser mais sensível em detectar índices mais elevados de compactação, acima de 3,0 Mpa, limiar que não foi registrado pelo PE em nenhum dos sistemas de uso e manejo nas profundidades estudadas (Figura 5).

Na análise de correlação de pearson (Figura 6), entre as médias obtidas, nos SUS e profundidades, foi possível observar um resultado satisfatório, pois houve alto coeficiente de correlação positiva entre o penetrômetro de impacto e o penetrômetro eletrônico ($r=0,945$). Apesar de haver diferenças nas mensurações entre os equipamentos, em alguns sistemas de uso e manejo e profundidades (Figura 5), a correlação demonstra que ambos os equipamentos conseguem detectar mudanças ocorridas no perfil do solo com precisão, com a obtenção de valores em Mpa baixos e elevados.

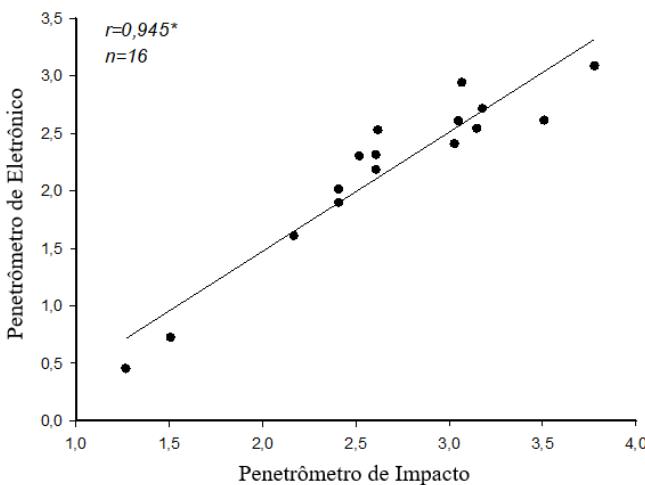


Figura 6. Correlação de Pearson entre os valores médios de resistência do solo à penetração determinados com o penetrômetro eletrônico e impacto.

Comportamento semelhante foi obtido por Beutler et al. (2007), no qual obtiveram elevada correlação ($r=0,98$) entre o penetrômetro eletrônico e de impacto, uma vez que aumentando-se a compactação do solo há resultados em valores mais elevados em Mpa, embora com variações de magnitude. Além disso, outras informações, como a textura, densidade do solo, porosidade solo, o volume de raízes e os componentes de produtividade podem servir de correlações para possíveis afirmações de subestimação ou superestimação dos valores de Mpa aferidos entre os equipamentos.

CONCLUSÕES

Os maiores valores de RMSP foram observados para a PA-D, entre 0-20 cm, e para EU nas camadas subsuperficiais avaliadas (20-40 cm).

O penetrômetro de impacto mensurou valores superiores (Mpa) comparado ao penetrômetro eletrônico, ambos eficientes.

Os valores obtidos pelos dois equipamentos se relacionam demonstrando confiabilidade entre os métodos.

REFERÊNCIAS

AGUIAR MI. 2008. Qualidade física do solo em sistemas agroflorestais. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas). Viçosa: UFV. 89p.

ASABE - American Society of Agricultural and Biology Engineering. Standards 2006 93: ASABES313.1 FEB 04 Soil cone penetrometer. St. Joseph: ASABE, 2006. p.391-398.

ABDALLA, A. L.; SILVA, F. F.; GOMES, S. T.; SOUZA, S. F.; PEREIRA, L. G. R. Methane emissions and estimates of ruminal fermentation parameters in dairy cows fed different dietary concentrate levels. Revista Brasileira de Zootecnia, v.47, e20170218, 2018.

BADORRECK, A.; GERKE, H. H.; HÜTTL, R. F. Morphology of physical soil crusts and infiltration patterns in an artificial catchment. Soil Till. 129, 1–8, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.01.001>.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SILVA, A.P. Comparação de penetrômetros na avaliação da compactação de Latossolos. **Engenharia Agrícola**, 27:146-151, 2007.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SILVA, A.P.; BARBOSA, J.C. Intervalo hídrico ótimo e produtividade de cultivares de soja. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, n.3, 2006, p.639-645.

BORGHI, E.; NETO, M.M.G., RESENDE; R.M.S.; ZIMMER, A.H.; ALMEIDA, R.G.; MACEDO, M.C.M (2018). Recuperação de pastagens degradadas. In MM Nobre & IR Oliveira (Eds.), Agricultura de Baixo Carbono Tecnologias e Estratégias de Implantação (pp. 105 – 138). Embrapa Milho e Sorgo.

BONETTI, J. A.; ANGHINONI I.; MORAES, M. T.; FINK, J.R. Resilience of soils with different texture, mineralogy and organic matter under long-term conservation systems. Soil tillage res. v. 174, p. 104-112, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.06.008>

COLOMBO, G. A.; LOPES, M. B. S.; DOTTO, M. C.; CAMPESTRINI, R.; DE OLIVEIRA LIMA, S. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico sob diferentes sistemas de manejo no cerrado tocantinense. **Revista Campo Digital**, v.12, n.1, 2017.

DIAS-FILHO, M. B., LOPES, M. J. S. Processos e causas da degradação de pastagens na Amazônia. In: DIAS-FILHO, M. B., ANDRADE, C. M. S. Recuperação de pastagens degradadas na mazônia. Cap.2, pg. 55, 2019.

EMBRAPA – Empresa brasileira de pesquisa agropecuária. Síntese Ocupação e Uso das Terras no Brasil. 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/car/sintese>. Acesso em: 11 de out. 2025.

FERREIRA JUNIOR, O.J.; LIMA, S.O.; SILVA, R.R.; ALMEIDA, R.E.M.; SANTOS, W.F.; ANDRADE, C.A.O.; NUNES, B.H.D.N.; LEITE, O.C.; CAMARGO, F.P.; BORTOLON, L.; BORTOLON, E.S.O.; DIAS, J.S. Desempenho agronômico e estado nutricional da cultura da soja em consórcio com espécies forrageiras tropicais. In: Excelência técnica e sustentabilidade nas Ciências Agrárias 4. Editora Atena, Ponta Grossa, 2025.

FERNANDES, M. M. H., COELHO, A. P., SILVA, M. F., BERTONHA, R. S., QUEIROZ, R. F., FURLANI, C. E. A., FERNANDES, C. Estimation of soil penetration resistance with standardized moisture using modeling by artificial neural networks. *Catena*, v.189. p. 1-9. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104505>

GABRIEL, J. L.; GARCÍA-GONZÁLEZ, I.; QUEMADA, M., MARTIN-LAMMERDING, D.; ALONSO-AYUSO, M.; HONTORIA, C. Cover crops reduce soil resistance to penetration by preserving soil surface water content. *Geoderma*, v.386, p.1-8. 2021.

HEBB, C., SCHODERBEK, D., HERNANDEZ-RAMIREZ, G., HEWINS, H., CARLYLE, C. M., BARK, E. Soil physical quality varies among contrasting land uses in Northern Prairie regions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v.240, p.14-23, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.02.008>

HUOT, C.; ZHOU, Y.; PHILIP, J. N. M.; DENTON, M. D. Root depth development in tropical perennial forage grasses is related to root angle, root diameter and leaf area. *Plant and Soil*. vol. 456, pg. 145–158, 2020.

LIMA, R. P., León, M. J., SILVA, A. R. Comparison between two penetrometers in the evaluation of soil resistance to penetration. *Revista Ceres*, v.60, n4, Ago 2013. <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2013000400018>

KAMPF, N.; CURI, N. 2012. Conceito de solo e sua evolução histórica. In: KER, J. C.; CURI, N.; SCHAEFER, C. E. G. R. & VIDAL-TORRADO, P. eds. Pedologia: fundamentos. Viçosa, MG. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 343p.

KÖPPEN, W. Climatología: con un estudio de los climas de la tierra. México: Fondo de Cultura Económica. 1948, 478p.

MAZURANA, M.; LEVIEN, R.; MÜLLER, J.; CONTE, O. Sistemas de preparo de solo: alterações na estrutura do solo e rendimento das culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, n.4, p.1197-1206, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832011000400013>.

MOLIN, J. P.; DIAS, C. T. dos S.; CARBONERA, L. Estudo de penetrometria: Novos equipamentos e amostragem correta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n.5, p.584- 590. 2012.

OHLAND, T.; LANA, M. do C.; FRANDOLOSO, F.; RAMPIM, L.; BERGMANN, J. R.; CABREIRA, D. T. Influência da densidade do solo no desenvolvimento inicial do pinhão-manso cultivado em Latossolo Vermelho eutroférico. **Revista Ceres**, Viçosa-MG, v. 61, n.5, p. 622-630, 2014.

OLIVEIRA, V. S.; ROLIM, M. M.; VASCONSELOS, R. F. B.; COSTA, Y. D. J.; PEDROSA, E. M. R. Compactação de um Argissolo Amarelo distrocoeso submetido a diferentes manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande-PB, v.14, n. 7, p.914-920, 2010.

OLIVEIRA, A. P. P. de.; LIMA, E.; ANJOS, L. H. C. dos.; ZONTA, E.; PEREIRA, M. G. Sistemas de colheita da cana-de-açúcar: Conhecimento atual sobre modificações em atributos de solos de tabuleiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande-PB, v.18, n.9, p.939–947, 2014.

ROBOREDO, D.; MAIA, J. C. S.; OLIVEIRA, O. J.; ROQUE, C. G. Uso de dois penetrômetros na avaliação da resistência mecânica de um Latossolo vermelho distrófico. **Engenharia Agrícola**, 30:307-314, 2010.

SCHLOTZHAVER, S.D.; LITTELL, R.C. SAS: System for elementary statistical analysis 2.ed. Cary, 1997. 905p.

SILVA, M. O.; VELOSO, C. L.; NASCIMENTO, D. L.; OLIVEIRA, J.; PEREIRA, D.F.; COSTA, K.D.S. Indicadores químicos e físicos de qualidade do solo. **Brazilian Journal of Development**, v.6, n.7, p. 47838-47855, 2020. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n7-431>

SOUZA, D. M. G.; LOBATO, E. Calagem e adubação para culturas anuais e semiperenes. In: SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (ed). **Cerrado: Correção do solo e adubação**. 2 ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004, p. 308-310.

SOUZA, C. C. C., MONTAGNER, D. B., ARAÚJO, A. R., EUCLIDES, V. P. B., DIFANTE, G. S., GURGEL, A. L. C. SOUZA, D. L. The soil-plant interface in Megathyrsus maximus cv. Mombasa subjected to different doses of nitrogen in rotational grazing. **Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias**. v.12, n.4, p.1098-1116, 2021. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v12i4.5904>

STEFANOSKI, D. C.; SANTOS, G. S.; MARCHÃO, R. L.; PETTER, F. A.; PACHECO, L. P. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande-PB, v.17, n.12, p.1301-309, 2013.

STOLF, R.; et. al. Penetrômetro de impacto Stolf - Programa Computacional de dados em EXCELVBA. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.38 n.3 Viçosa 2014.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 15:229-35, 1991.

TAYLOR, H.M.; ROBERSON, G.M.; PARKER Jr., J.J. Soil strength-root penetration relations to medium to coarse-textured soil materials. **Soil Science**, Baltimore, v.102, n.1, p.18-22, 1966.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. Manual de métodos de análise de solo. 3 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2017. 574p.

TORRES, J. L. R.; ASSIS, R. L.; LOSS, A. Evolução entre os sistemas de produção agropecuária no Cerrado: convencional, Barreirão, Santa Fé e Integração LavouraPecuária. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.39, n.302, p.7-17, 2018.

TORRES, J. L. R.; RODRIGUES JUNIOR, D. J.; VIEIRA, D. M. S. Alterações nos atributos físicos do solo em função da irrigação e do pastejo rotacionado. **Irriga**, v.18, n.3, p.558-571, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2013v18n3p558>