

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

ÍTALO LIMA NUNES

**AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE SUPORTE E CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO
SOLO NO SISTEMA CUT-TO-LENGTH MECANIZADO**

VIÇOSA – MINAS GERAIS

2021

ÍTALO LIMA NUNES

**AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE SUPORTE E CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO
SOLO NO SISTEMA CUT-TO-LENGTH MECANIZADO**

Dissertação apresentada a Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Luciano José Minette

VIÇOSA – MINAS GERAIS

2021

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

L732a
2021
Lima, Ítalo Nunes, 1995-
Avaliação da capacidade de suporte e caracterização física
do solo no sistema cut-to-length mecanizado / Ítalo Nunes Lima.
– Viçosa, MG, 2021.
46 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Luciano José Minette.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Solos - Compactação. 2. Máquinas florestais. 3. Geologia
- Métodos estatísticos. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Florestal. Programa de
Pós-Graduação em Ciência Florestal. II. Título.

CDO adapt. CDD 634.9114


ÍTALO LIMA NUNES

**AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE SUPORTE DO SOLO E ATRIBUTOS
FÍSICOS EM SISTEMA CUT-TO-LENGTH MECANIZADO**

Dissertação apresentada a Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 03 de fevereiro de 2021

Assentimento:



Ítalo Lima Nunes
Autor


Luciano José Minette
Orientador

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pelo dom da vida;

Ao meu pai João Batista e minha mãe Lúcia Silva, pelo amor, cuidado, incentivo e dedicação;

A minha irmã Thamille Lima Nunes, pelo amor e carinho e me ajudar nos momentos difíceis;

Aos meus tios, tias, primos, avós, minha base, por todos os momentos e força para chegar até aqui;

A minha madrinha Cleonice, por todo apoio e solicitude ao longo dessa trajetória;

Aos meus amigos: Aldair Rocha, Catiúrsia Dias, Marcela Guedes, Lucas Gabriel e Raquel Amorim pelas resenhas diárias;

Aos meus amigos: Caio Torres, Danússia Souto, Fábiana Maria, Lydianne Lucia e Mayra Castro por todos os momentos;

A Nídia Niela, minha namorada e companheira que sempre incentivou em todos os momentos pelos quais passei até chegar aqui;

Ao meu Orientador Professor Doutor Luciano José Minette, pela confiança, amizade e ensinamentos ao longo dos anos;

Ao Professor Doutor Elton da Silva Leite, pelo incentivo na pesquisa, confiança, amizade e ensinamentos desde a graduação até aqui, sem seu apoio não teria conseguido;

Ao Professor Genelício Crusoé pela disponibilidade e solicitude em contribuir com a pesquisa;

A Márcia Oliveira pela solicitude e amizade;

Ao Laboratório de Ergonomia Florestal;

Ao Laboratório de Física do Solo;

Ao Departamento de Engenharia Florestal;

A Pós-graduação em Ciência Florestal;

A Universidade Federal de Viçosa;

A Universidade Federal do Recôncavo da Bahia;

A empresa florestal pela receptividade e auxílio para o desenvolvimento do trabalho;

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pelo apoio e auxílio concedidos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001

Enfim, a todos aqueles que, direta ou indiretamente, em maior ou menor grau, participaram para a concretização deste trabalho.

RESUMO

NUNES, Ítalo Lima, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2021. **Avaliação da capacidade de suporte e caracterização física do solo no sistema cut-to-length mecanizado.** Orientador: Luciano José Minette.

O Brasil é líder mundial em produção de madeira de florestas plantada, sendo a operação de colheita mecanizada destaque no cenário econômico, social e ambiental. O efeito do tráfego das máquinas de corte e extração alteram as propriedades físicas do solo, causando a sua degradação e promovendo redução da produtividade. Objetivou-se neste estudo: avaliar a capacidade suporte de solos florestais (1) e a compactação do solo associada a tráfego de máquinas na colheita do eucalipto (2). O estudo (1) foi realizado em seis áreas no estado da Bahia, realizando a análise de compressão para as pressões de 25, 50, 100, 200, 400 e 800 kPa. a partir de amostras indeformadas do solo nas camadas (0,0-0,20 m; 0,20-0,40 m; 0,40-0,60 m). Os resultados evidenciaram que o ponto de deformação plástica para as áreas superficiais é inferior ao da profundidade 0,4 m até 0,6m, evidenciando que a transferência de pressão uniaxial até 40 cm é extremamente degradante a qualidade física do solo. As pressões que separam as regiões de deformação elástica a partir de deformação plástica varia de 200 a 400 kPa e o grau de compactação médio foi de 103%. No estudo (2) avaliou-se o índice de dependência espacial (IDE) da resistência à penetração (RSP), densidade e porosidade do solo em dois solos sob plantio de eucalipto, além de avaliar o incremento da RSP após o tráfego e número de passada das máquinas. O IDE foi moderado para todas as variáveis da área 1 e 2. A colheita com o harvester e número de passadas do forwarder aumentaram a RSP em 380% para área 1 e 333% para área 2.

Palavras-chave: Máquinas florestais. Compactação. Geoestatística.

ABSTRACT

NUNES, Ítalo Lima, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February 2021. **Evaluation of the support capacity and physical characterization of the soil in the mechanized cut-to-length system.** Advisor: Luciano José Minette.

Brazil is a world leader in the production of wood from planted forests, with the mechanized harvesting operation standing out in the economic, social and environmental scenario. The traffic effect of the cutting and extraction machines changes the physical properties of the soil, causing its degradation and promoting reduced productivity. The objective of this study was: to evaluate the support capacity of forest soils (1) and soil compaction associated with machine traffic in the eucalyptus harvest (2). The study (1) was carried out in six areas in the state of Bahia, carrying out the compression analysis for pressures of 25, 50, 100, 200, 400 and 800 kPa. from undisturbed soil samples in the layers (0.0-0.20 m; 0.20–0.40 m; 0.40–0.60 m). The results showed that the point of plastic deformation for the surface areas is lower than that of the depth 0.4 m to 0.6 m, showing that the transfer of uniaxial pressure up to 40 cm is extremely degrading to the physical quality of the soil. The pressures that separate the regions of elastic deformation from plastic deformation vary from 200 to 400 kPa and the average degree of compaction was 103%. In study (2), the spatial dependency index (IDE) of penetration resistance (RSP), density and soil porosity in two soils under eucalyptus plantation were evaluated, in addition to evaluating the increase in RSP after traffic and number of past the machines. The IDE was moderate for all variables in area 1 and 2. Harvesting with the harvester and number of passes from the forwarder increased the RSP by 380% for area 1 and 333% for area 2.

Keywords: Forest machines. Compaction. Geostatistics.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	8
REFERÊNCIAS	10
CAPÍTULO I - CAPACIDADE DE SUPORTE DO SOLO DE FLORESTAS PLANTADAS ASSOCIADAS NA ATIVIDADE DE COLHEITA	
RESUMO.....	11
ABSTRACT	12
1.0. INTRODUÇÃO	13
2.0. METODOLOGIA.....	14
2.1. Áreas de estudo	14
2.2 Delineamento experimental	15
2.3. Ensaio de compressão.....	15
2.5. Associação aos sistemas de colheita	16
2.6. Análises	16
3.0. RESULTADOS E DISCUSSÃO	17
3.1. Capacidade de suporte do solo	17
3.3. Grau de Compactação.....	23
4.0. CONCLUSÃO.....	24
5.0. REFERÊNCIAS	25
CAPÍTULO II- VARIABILIDADE DA COMPACTAÇÃO DO SOLO EM FUNÇÃO DO TRÁFEGO DA COLHEITA FLORESTAL	
RESUMO.....	28
ABSTRACT	29
1.0. INTRODUÇÃO	30
2.0. METODOLOGIA.....	32
2.1. Caracterização da área de estudo	32
2.2. Coleta dos dados	33
2.4. Sistema de colheita	33
2.3. Resistência do solo a penetração	33
2.5. Variabilidade espacial	33
3.0. RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
3.1. Semivariograma.....	34

3.2. Resistência do solo a penetração	35
3.3. Modelagem da RSP submetido ao tráfego do forwarder.....	36
3.3. Densidade do solo	38
3.4. Porosidade Total.....	39
4.0. CONCLUSÃO.....	41
5.0. REFERÊNCIAS	42
CONCLUSÕES GERAIS	46

INTRODUÇÃO GERAL

A indústria de base florestal fechou 2019 com receita total de R\$ 97,4 bilhões, um crescimento de 12,6% em relação ao ano anterior, o equivalente a 5,2% das exportações, importante setor para o Brasil (IBÁ, 2020). Além da produtividade que impacta diretamente o custo do produto final, a sustentabilidade da operação pode reduzir danos e impactos ambientais nos sítios florestais, auxiliando a conservação do solo. Atualmente, a colheita e extração florestal são as etapas mais degradantes para o solo devido as grandes pressões exercidas pelas máquinas aliada ao tráfego e velocidade, sendo importante variável sobre a qualidade física do solo florestal.

A física do solo estuda qualitativa e quantitativamente as propriedades físicas, bem como sua medição, predição e controle, com o objetivo de entender os mecanismos que governam a funcionalidade dos solos e seu papel na biosfera (LARSON e PEARCE, 1994; BURRELL *et al.*, 2016; BLANCO-CANQUI e RUIS, 2018).

O solo para executar sua função de meio para o crescimento de plantas deve oferecer mínima resistência à penetração de raízes; permitir a livre entrada e moderada retenção de água da chuva, possuir boa aeração e permitir boa troca de gases com a atmosfera, apresentar mínima competição entre água e o ar na ocupação do seu espaço poroso, alta resistência à erosão, facilitar a incorporação de plantas e promover a atividade biológica (HORN *et al.*, 1994; JURY e STOLZY, 2018).

A compactação e o deslocamento do solo alteram o espaço dos poros e, conseqüentemente, modificam suas propriedades físicas, sendo um dos meios mais degradados pela colheita florestal (EBELING *et al.*, 2016). Os solos são um dos elementos do biótopo mais suscetíveis à degradação, devido ao manejo intenso que sofre em áreas florestais (KLATKA *et al.*, 2019). Os danos causados pela colheita em solos florestais diferem daqueles dos solos agrícolas, devido à espécie, tamanho, aos ciclos das culturas cultivadas e às máquinas utilizadas que são classificadas como de grande porte, que exerce cargas elevadas na superfície do solo.

As variações na trafegabilidade estão fortemente ligadas à capacidade de suporte do solo, que por sua vez é influenciado pela tipo de solo, pedregosidade, umidade e característica da floresta e da máquina (NIEMI *et al.*, 2017; SALMIVAARA *et al.*, 2018).

A partir disso, a capacidade de suporte pode ser utilizada como um indicador da resistência da estrutura do solo, em que a curva de compressão é dividida em duas regiões: uma de deformação elástica e recuperável, onde não ocorre compactação adicional no solo; e uma região de deformação plástica e não recuperável, acarretando o aumento da compactação do solo (GUBIANI *et al.*, 2018).

Com o intuito de compreender o processo de compactação do solo no setor florestal, objetivou-se com este estudo avaliar os atributos físicos do solo em função do tráfego e analisar a capacidade suporte na colheita mecanizada pelo sistema *Cut-to-Lenght* em povoamentos de eucalipto.

REFERÊNCIAS

- BLANCO-CANQUI, H.; RUIS, S.J. No-tillage and soil physical environment. **Geoderma**, v. 326, p. 164-200, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.03.011>
- BURRELL, L.D.; ZEHETNER, F.; RAMPAZZO, N.; WIMMER, B; SOJA, G. Long-term effects of biochar on soil physical properties. **Geoderma**, v. 282, p. 96-102, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.07.019>
- EBELING, C.; LANG, F.; GAERTIG, T. Structural recovery in three selected forest soils after compaction by forest machines in Lower Saxony, Germany. **Forest Ecology and Management**, v. 359, p. 74-82, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.09.045>
- GUBIANI, P.I.; PÉRTILE, P.; REICHERT, JM. Relationship of precompression stress with elasticity and plasticity indexes from uniaxial cyclic loading test. **Soil and Tillage Research**, v. 180, p. 29-37, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.02.004>
- HORN, R.; TAUBNER, H.; WUTTKE, M.; BAUMGARTL, T. Soil physical properties related to soil structure. **Soil and Tillage Research**, v. 30, p. 187-216. 1994.
- INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. (Brasil). Ano base 2019. **Relatório 2020**. Brasília, 2020. 66 p.
- JURY, W.A.; STOLZY, L.H. Soil physics. In: **Handbook of Soils and Climate in Agriculture**. CRC Press. p. 131-158. 2018.
- KLATKA, S.; MALEC, M.; RYCZEK, M. Analysis of Spatial Variability of Selected Soil Properties in the Hard Coal Post-Mining Area. **Journal of Ecological Engineering**, v. 20, p. 185-193, 2019. <http://dx.doi.org/10.12911/22998993/99781>.
- LARSON, W.E.; PIERCE, F.J. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F.; STEWART, B.A., eds. Defining soil quality for a sustainable environment. Madison, **Soil Science Society of America**, v.35, p. 37-51. 1994.
- NIEMI, M.T.; VASTARANTA, M.; VAUHKONEN, J.; MELKAS, T.; HOLOPAINEN, M. Airborne LiDAR-derived elevation data in terrain trafficability mapping. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 32, p. 762-773, 2017. <https://doi.org/10.1080/02827581.2017.1296181>
- SALMIVAARA, A.; MIETTINEN, M.; FINÉR, L.; LAUNIAINEN, S.; KORPUNEN, H.; TUOMINEN, S.; UUSITALO, J. Wheel rut measurements by forest machine-mounted LiDAR sensors—accuracy and potential for operational applications. **International Journal of Forest Engineering**, v. 29, p. 41-52, 2018.

RESUMO

NUNES, Ítalo Lima, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2021. **Capacidade de suporte do solo de florestas plantadas associadas na atividade de colheita.** Orientador: Luciano José Minette.

A colheita mecanizada tem importante papel no custo final da madeira e no solo. Os impactos da colheita causam a degradação do solo, necessitando conhecer as alterações para propor práticas de sustentabilidade e conservação do solo. Objetivou-se avaliar a capacidade de suporte de solo associadas na atividade de colheita. O estudo foi realizado em seis áreas do estado da Bahia-Brasil com povoamentos de *Eucalyptus* spp., nas profundidades de: 0,0-0,2; 0,2-0,4; 0,4-0,6m submetido as compressões de 0, 25, 50, 100, 200, 400 e 800 kPa. O aumento das pressões promoveu aumento da compactação, sendo possível definir os limites de elasticidade e início de deformação plástica. O teor de argila na área 1 favoreceu o aumento da plasticidade com o aumento das cargas. O ponto de deformação elástica para as áreas superficiais foi menor na profundidade 0,4 m até 0,6 m do solo, evidenciando que a transferência de pressão uniaxial até 40 cm é extremamente degradante a qualidade física do solo florestal. As pressões que separam as regiões de deformação elástica a partir de deformação plástica varia de 200 a 400 kPa. O grau de compactação de 103% demonstrou que as máquinas florestais causam uma degradação nas propriedades físicas do solo. A análise de compressão do solo permitiu uma seleção de áreas a serem operadas levando em consideração a umidade do solo, sendo uma alternativa para o planejamento e microplanejamento florestal e excelência operacional.

Palavras-chave: Técnica e operações. Máquinas florestais. Compactação.

ABSTRACT

NUNES, Ítalo Lima, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February 2021. **Soil support capacity of planted forests associated with harvesting activity.** Advisor: Luciano José Minette.

Mechanized harvesting plays an important role in the final cost of wood and soil. Harvest impacts cause soil degradation, needing to know the changes to propose soil conservation and sustainability practices. The objective was to evaluate the soil support capacity associated with the harvesting activity. The study was carried out in six areas of the state of Bahia-Brazil with stands of *Eucalyptus* spp., At the depths of: 0.0-0.2; 0.2-0.4; 0.4-0.6m subjected to compressions of 0, 25, 50, 100, 200, 400 and 800 kPa. The increase in pressures promoted an increase in compaction, making it possible to define the limits of elasticity and the beginning of plastic deformation. The clay content in area 1 favored an increase in plasticity with an increase in loads. The point of elastic deformation for the superficial areas was lower in the depth 0.4 m to 0.6 m of the soil, showing that the transfer of uniaxial pressure up to 40 cm is extremely degrading to the physical quality of the forest soil. The pressures that separate the regions of elastic deformation from plastic deformation vary from 200 to 400 kPa. The degree of compaction of 103% demonstrated that forest machines cause a degradation in the physical properties of the soil. The analysis of soil compression allowed a selection of areas to be operated taking into account the soil moisture, being an alternative for forest planning and microplanning and operational excellence.

Keywords: Technique and operations. Forest machines. Compaction.

CAPÍTULO I - CAPACIDADE DE SUPORTE DO SOLO DE FLORESTAS PLANTADAS ASSOCIADAS NA ATIVIDADE DE COLHEITA

1.0. INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos países mais desenvolvidos do setor florestal, isso devido a alta produtividade e menor custo de produção em comparação com outros países, aos avanços tecnológicos e condições edafoclimáticas favoráveis à produção (SANTOS *et al.*, 2017). A área de árvores plantadas para fins industriais no Brasil alcançou 9 milhões de hectares em 2019, se mantendo como liderança no ranking global, representando 1,2% de toda a riqueza gerada no País e 6,9% do PIB industrial (IBÁ, 2020).

Com a crescente demanda da produção e aumento das áreas cultivadas no Brasil é cada vez mais frequente estudos envolvendo a qualidade física do solo (TORMENA *et al.*, 1998; LIMA *et al.*, 2013; ASSIS *et al.*, 2015). Os maiores impactos nas propriedades físicas do solo ocorrem na atividade de colheita, que alteram a densidade, macroporosidade e a resistência do solo à penetração (CARVALHO *et al.*, 2008; SILVA *et al.*, 2011; SZYMCZAK *et al.*, 2014).

A colheita é a etapa mais importante economicamente, dada a sua alta participação no custo final do produto e os riscos de perdas envolvidos nessa atividade (MACHADO e LOPES 2000; SCHETTINO *et al.*, 2015). O tráfego intensivo de máquinas é o principal responsável pelo aumento da densidade e resistência do solo (RESENDE *et al.*, 2011), diminuição da macroporosidade e condutividade hidráulica (SUZUKI *et al.*, 2007), o que resulta em compactação e alteração do meio no qual o sistema radicular se desenvolve (MARCHÃO *et al.*, 2007).

O impacto das máquinas tem sido avaliado por meio das propriedades físicas do solo, como condutividade hidráulica, densidade, porosidade e resistência à penetração e pressão de pré-consolidação (CARNEIRO *et al.*, 2009; GONÇALVES *et al.*, 2013). A pressão de pré-consolidação permite estimar os níveis de pressões que podem ser aplicados no solo separando as áreas de deformações elásticas que não exercem compactação adicional das áreas de deformação plástica que causam compactação adicional no solo. Identificar essas regiões permite otimizar as operações de colheita florestal e reduzir custos futuros como escarificação das áreas e subsolagem da linha de plantio. O estudo da pré-consolidação permite compreender a dinâmica do solo e favorece a excelência operacional. Diante disso, o objetivo do estudo foi determinar a capacidade de suporte do solo de florestas plantadas associadas na atividade de colheita.

2.0. METODOLOGIA

2.1. Áreas de estudo

O estudo foi realizado em seis áreas cultivadas com eucalipto em 4 municípios do estado da Bahia (Figura 1), coletas realizadas em fevereiro e março de 2020 em áreas com povoamentos de *Eucalyptus* spp e variando a precipitação de acordo a tabela 1. A descrição de textura Argilo-Arenosa (área 1) e Franco-Argilo-Arenosa (áreas 2, 3, 4 e 5) (Tabela 2).

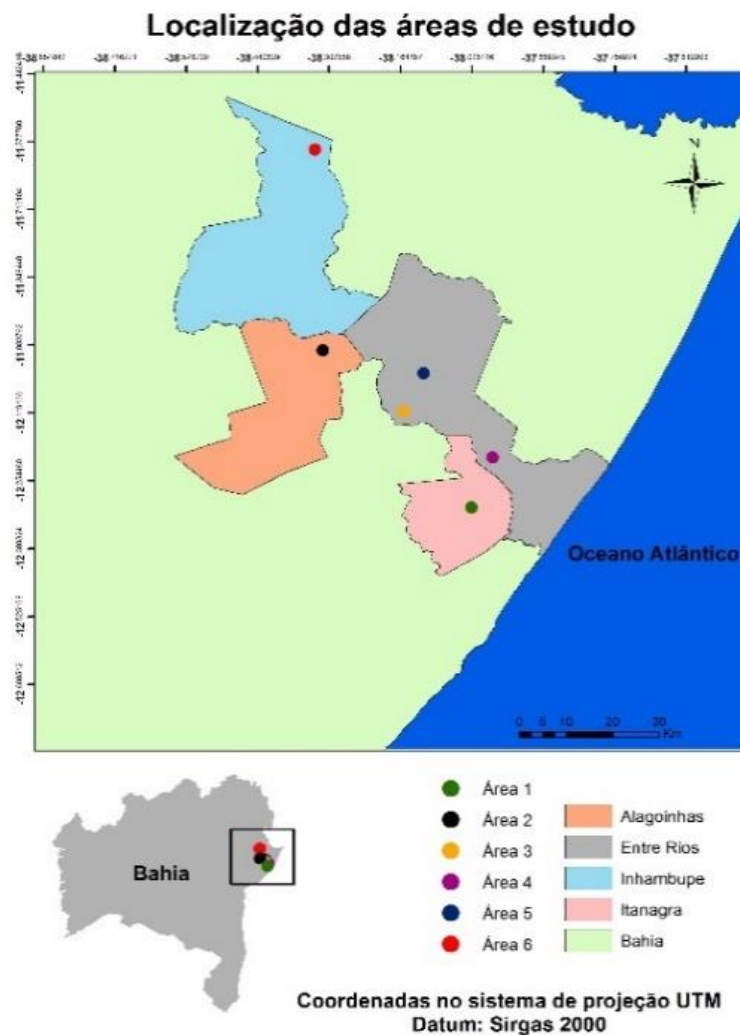


Figura 1. Localização das áreas de avaliação da capacidade de suporte do solo.

Tabela 1 – Precipitação anual, classificação do clima de acordo Koppen e classificação do solo.

Área	Município	Precipitação anual (mm)	Koppen	Classificação do solo
1	Itanagra	1792	Af	Argissolo Amarelo distrocoeso fragipânico
2	Alagoíneas	1478	Af	Argissolo Amarelo distrófico

3	Entre Rios	1050	Af	Argissolo Amarelo distrófico
4	Entre Rios	1050	Af	Argissolo Amarelo distrófico coeso
5	Entre Rios	1050	Af	Argissolo Amarelo distrófico
6	Inhambupe	1163	As	Latossolo Amarelo distrófico

Af (tropical úmido ou super úmido, sem estação seca); As = Clima de savana, apresenta uma estação mais seca no verão, onde o mês mais seco tem precipitação inferior a 60 mm.

Tabela 2 - Composição granulométrica do solo para as áreas em estudo

Área	Profundidade	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila	Classificação (SBCS)
		Kg/Kg ⁻¹				
1	0-20	0,290	0,223	0,023	0,464	Argilo-Arenosa
	20-40	0,310	0,203	0,030	0,457	Argilo-Arenosa
	40-60	0,325	0,188	0,038	0,449	Argilo-Arenosa
2	0-20	0,306	0,275	0,060	0,359	Franco-Argilo-Arenosa
	20-40	0,349	0,256	0,048	0,347	Franco-Argilo-Arenosa
	40-60	0,368	0,261	0,036	0,335	Franco-Argilo-Arenosa
3	0-20	0,350	0,362	0,070	0,218	Franco-Argilo-Arenosa
	20-40	0,345	0,367	0,088	0,200	Franco-Argilo-Arenosa
	40-60	0,340	0,372	0,106	0,182	Franco-Argilo-Arenosa
4	0-20	0,328	0,300	0,030	0,342	Franco-Argilo-Arenosa
	20-40	0,303	0,325	0,034	0,338	Franco-Argilo-Arenosa
	40-60	0,278	0,350	0,038	0,334	Franco-Argilo-Arenosa
5	0-20	0,287	0,380	0,038	0,295	Franco-Argilo-Arenosa
	20-40	0,291	0,371	0,025	0,313	Franco-Argilo-Arenosa
	40-60	0,295	0,362	0,012	0,331	Franco-Argilo-Arenosa
6	0-20	0,340	0,367	0,023	0,270	Franco-Argilo-Arenosa
	20-40	0,331	0,396	0,039	0,234	Franco-Argilo-Arenosa
	40-60	0,322	0,393	0,055	0,230	Franco-Argilo-Arenosa

Legenda: SBCS - Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.

2.2 Delineamento experimental

Utilizou-se o delineamento estatístico inteiramente casualizados em esquema fatorial 3X7 (profundidade da camada de solo e pressões de consolidação). O ensaio fatorial foi constituído pelas profundidades do solo (0,0-0,20 m; 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m) com 5 repetições e pelas pressões do ensaio de compressão (0,0 kPa; 25,0 kPa; 50,0 kPa; 100,0 kPa; 200,0 kPa; 400,0 kPa e 800 kPa).

2.3. Ensaio de compressão

As amostras indeformadas foram coletadas utilizando amostrador de Uhland e anéis de alumínio de 2,50 cm de altura por 6,30 cm de diâmetro. Após devidamente preparadas, as

amostras com estrutura indeformada foram saturadas, durante 48 horas, por elevação gradual de lâmina de água numa bandeja, até atingir cerca de 2/3 da altura da amostra. Em seguida foram submetidas a mesa de tensão ao potencial matricial de 10 kPa, referente ao ponto da capacidade de campo. Posteriormente, essas amostras foram usadas no ensaio de compressão uniaxial utilizando um consolidômetro da marca COMTEC, modelo MDE-100.

No ensaio de compressão as amostras indeformadas foram submetidas a pressões de 0,0 kPa; 25,0 kPa; 50,0 kPa; 100,0 kPa; 200,0 kPa; 400,0 kPa e 800 kPa. Cada pressão (p) foi aplicada por 5 minutos até atingir 90% da deformação máxima (SILVA *et al.*, 2000). Durante o intervalo era mensurada a compressão exercida na amostra através de paquímetro digital, e, posteriormente, foram colocadas para secar em estufa, a 105 °C, por 48 h, para determinação da densidade do solo (Ds), de acordo com Embrapa (2011).

2.4. Grau de Compactação

O grau de compactação do solo foi calculado pela equação 1.

$$G_c = \frac{D_s - D_{s0}}{D_{s0} - D_{s0ref}} \times 100 \quad (\text{Eq.1})$$

em que: D_s é a densidade do solo; e D_{sRef}, a densidade do solo após a aplicação de 200 kPa, conforme Reichert *et al.* (2009).

A densidade máxima foi determinada com equação 2 adaptada de Araujo *et al.* (2011), onde:

$$D_{max} = D_{s0} + 0,12 * D_{s0} \quad (\text{Eq.2})$$

Em que: D_{max}: densidade máxima do solo; D_{s0}: densidade inicial

2.5. Associação aos sistemas de colheita

A associação ao sistema de colheita avaliado foi o de toras curtas (*cut-to-length*), com corte e processamento realizados por uma colhedora *Harvester*, peso de 22.9000 kg e rodados de esteiras. A simulação para a extração da madeira pelo *Forwarder* de peso 20.700 kg, rodados de pneus 6x6 e volume médio da carga de 16 m³ trafegando sobre os resíduos de corte e processamento da madeira. As pressões médias aplicadas pelas máquinas de colheita foram de 200 kPa para o *harvester* e 220 kpa para o *forwarder*.

2.6. Análises

Os resultados da capacidade de suporte do solo e grau de compactação foram submetidos à análise de variância e realizadas as regressões, entre as áreas e dentro das áreas e a comparação das médias foi feita pelo teste de ScottKnott, utilizando-se o programa estatístico R.

3.0. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Capacidade de suporte do solo

Os modelos de capacidade de suporte de carga do solo evidenciaram variações dos modelos para as áreas de florestas plantadas (Tabelas 3 e 4), onde as propriedades físicas do solo foram as causadoras dessa variação, sendo um fator a ser considerado para a realização da colheita, podendo reduzir a degradação do solo quando levado em consideração a susceptibilidade de cada área. O menor valor do coeficiente b_0 encontrado foi para a área 1 que pode estar associado ao menor valor de densidade do solo, bem como, ao menor valor de umidade volumétrica para a curva de compressão do solo; resultado semelhante ao encontrado por Araújo *et al.* (2011), que avaliaram a compressão de Latossolo, onde os coeficientes foram inferiores em áreas com menor D_s .

Tabela 3. Parâmetros da modelagem de regressão para a capacidade de suporte do solo em áreas cultivadas com eucalipto no estado da Bahia, Brasil.

Áreas	b_0	b_1	b_2	R^2 (%)
1	1,550655	0,001052	-0,000001	95,6
2	1,641806	0,000568	-0,000001	98,36
3	1,551424	0,001000	-0,000001	94,87
4	1,602539	0,000849	-0,000001	97,16
5	1,587128	0,000671	-0,000001	99,03
6	1,739420	0,000822	-0,000001	97,04

Legenda: R^2 - Coeficiente de correlação; b_0 , b_1 e b_2 - parâmetros de ajuste de regressão.

Tabela 4. Parâmetros da regressão para a umidade volumétrica do solo em função da compressão do solo em áreas sob cultivo de eucalipto no estado da Bahia, Brasil.

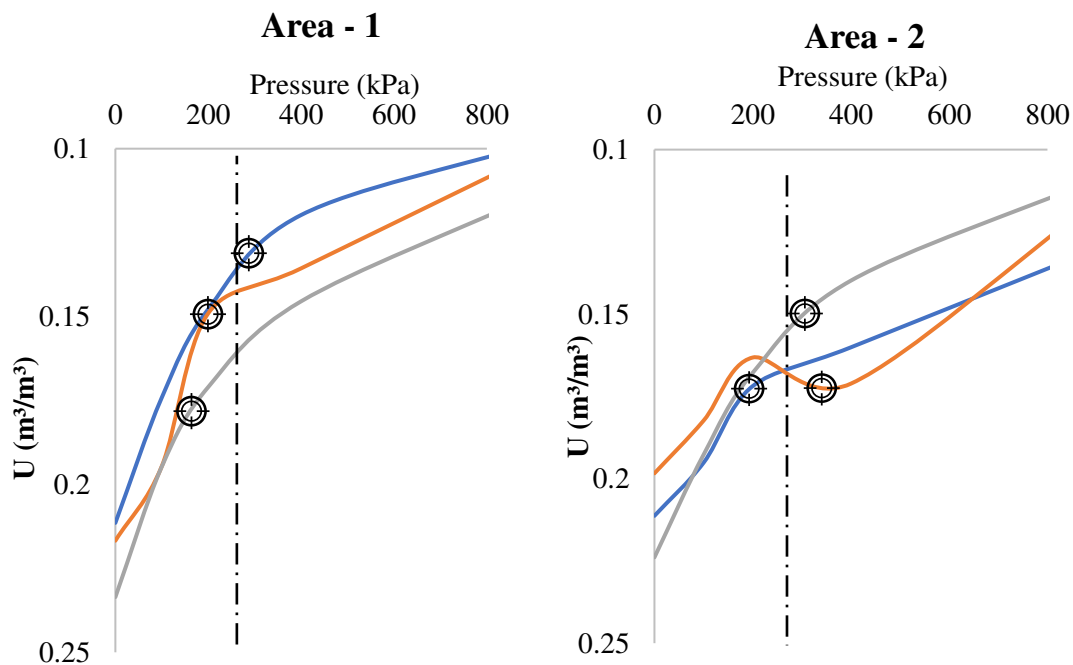
Área	b_0	b_1	R^2 (%)
1	0,318609	-0,00018	96,5
2	0,341677	-0,00022	97,19
3	0,375139	-0,00030	97,31
4	0,341791	-0,00012	96,4
5	0,356799	-0,00016	98,02
6	0,328048	-0,00012	96,7

Em que: R^2 - Coeficiente de correlação; b_0 e b_1 - parâmetros de ajuste de regressão.

A figura 2 apresenta os modelos de compressão do solo. A área 1 por possuir maior teor de argila em sua constituição em relação as demais áreas, apresenta maior densidade em menores pressões, sendo as camadas superficiais mais susceptíveis a maiores deformações plásticas, deformações definitivas que necessitam de intervenção mecânica na linha de tráfego

das máquinas, semelhante ao encontrado por Silva *et al.*, (2006) em Latossolo, demonstrando que solos argilosos podem alterar seu arranjo em menores umidades.

Observa-se que à medida que a carga de compressão aumenta, a capacidade de promover compactação das máquinas também aumenta, chegando ao limite entre a deformação elástica para a plástica. O ponto de inflexão para as áreas superficiais é inferior ao da profundidade 40 cm até 60 cm, evidenciando que a transferência de pressão uniaxial até 40 cm é extremamente degradante a qualidade física do solo florestal. Rodrigues *et al.*, (2020) encontrou resultados similares onde as camadas de 0-20 cm são extremamente degradadas à colheita e extração florestal mecanizada.



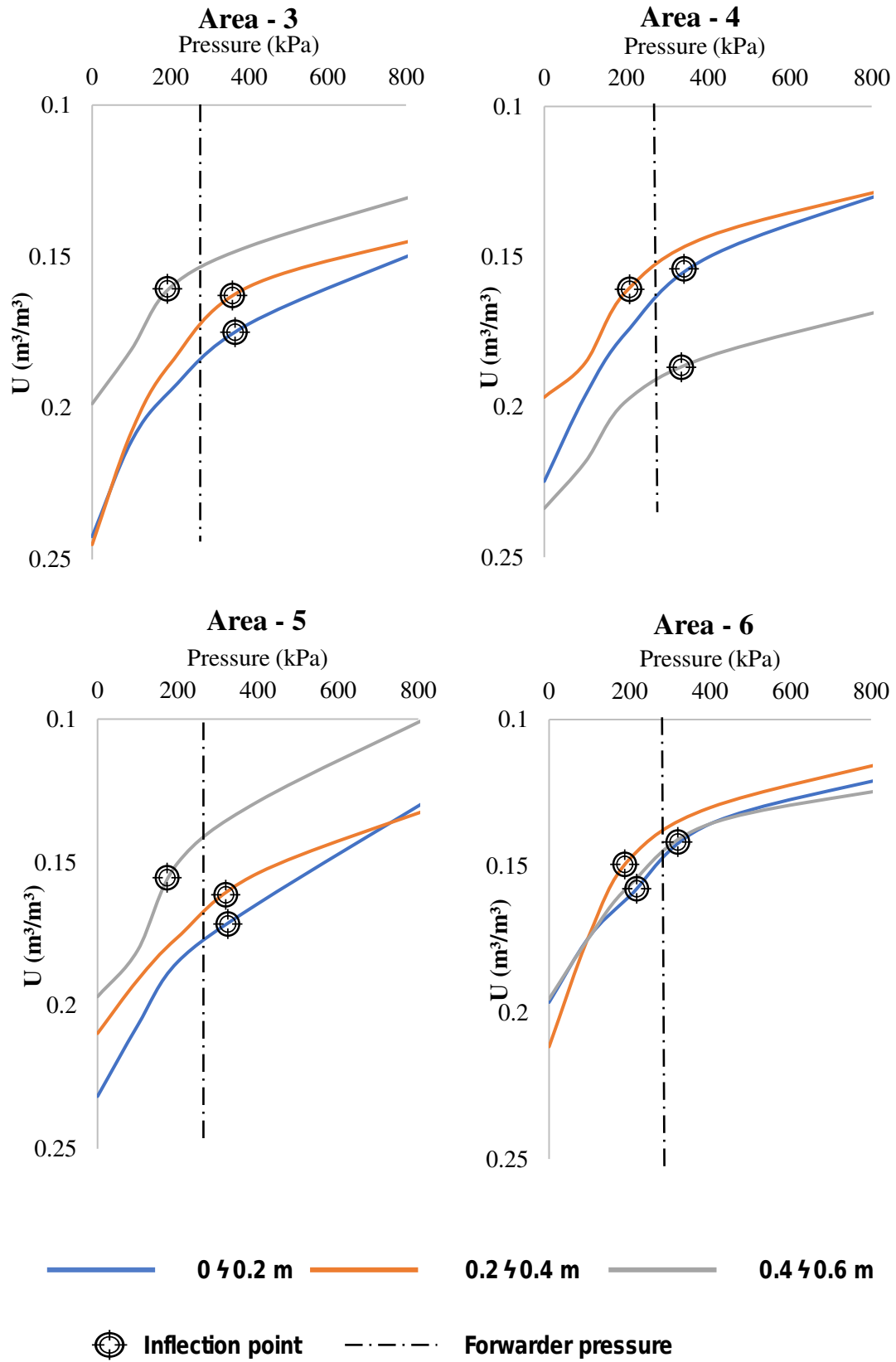


Figura 2. Modelos da umidade do solo em função da compressão (kPa) para diferentes áreas e classes de texturas em camadas de 0–0.2 m, 0.2-0.4 m e 0.4–0.6 metros.

É possível identificar a região predominantemente com deformações elásticas, seguidas por uma região de deformações plásticas. Portanto, na figura 2 é possível ajustar o conceito de (p) como um valor de (p) que separa regiões de deformação elástica a partir de deformação plástica, que está variando de 200 kPa nas áreas 1 e 6, a 300 kPa nas áreas 2, 3, 4 e 5, dentre as áreas estudadas. O ponto de inflexão como um determinante da deformação elástica para a plástica é um indicador da qualidade física do solo, portanto, quanto maior o ponto de inflexão, maior consequentemente é a capacidade de suporte do solo e maior a possibilidade de manejos independentes.

O maior teor de areia grossa (áreas 3, 4 e 5) nas camadas superficiais, contribuiu para a maior infiltração, a influência dessa fração fica evidente quando observamos a pressão a 800 kpa, onde essas áreas ainda apresentam umidade, podendo permear diferentes tipos de umidades e pressões antes de atingir a consolidação das camadas do solo, o que não ocorre nas demais áreas.

Os valores de densidade do solo não foram alterados pelas diferentes profundidades em relação as áreas (Tabela 5), isso ocorre devido a composição mineralógica e estrutural do solo. Os efeitos observados na D_s na profundidade de 0–20 cm são possivelmente decorrentes da faixa de fechamento do solo que quando submetido a pressão apresenta um alto incremento inicial na densidade.

O modelo é adaptado de Araujo *et al.*, (2011), e o que difere da equação é o valor da compactação máxima, onde os valores médios das áreas foram de 1,77 g/cm³. Para culturas agrícolas. Reichert *et al.*, (2009) constataram que os valores de densidade crítica variam de 1,25 a 1,30 g/cm³ em solos argilosos, demonstrando a adaptabilidade da cultura do eucalipto em condições de maior densidade.

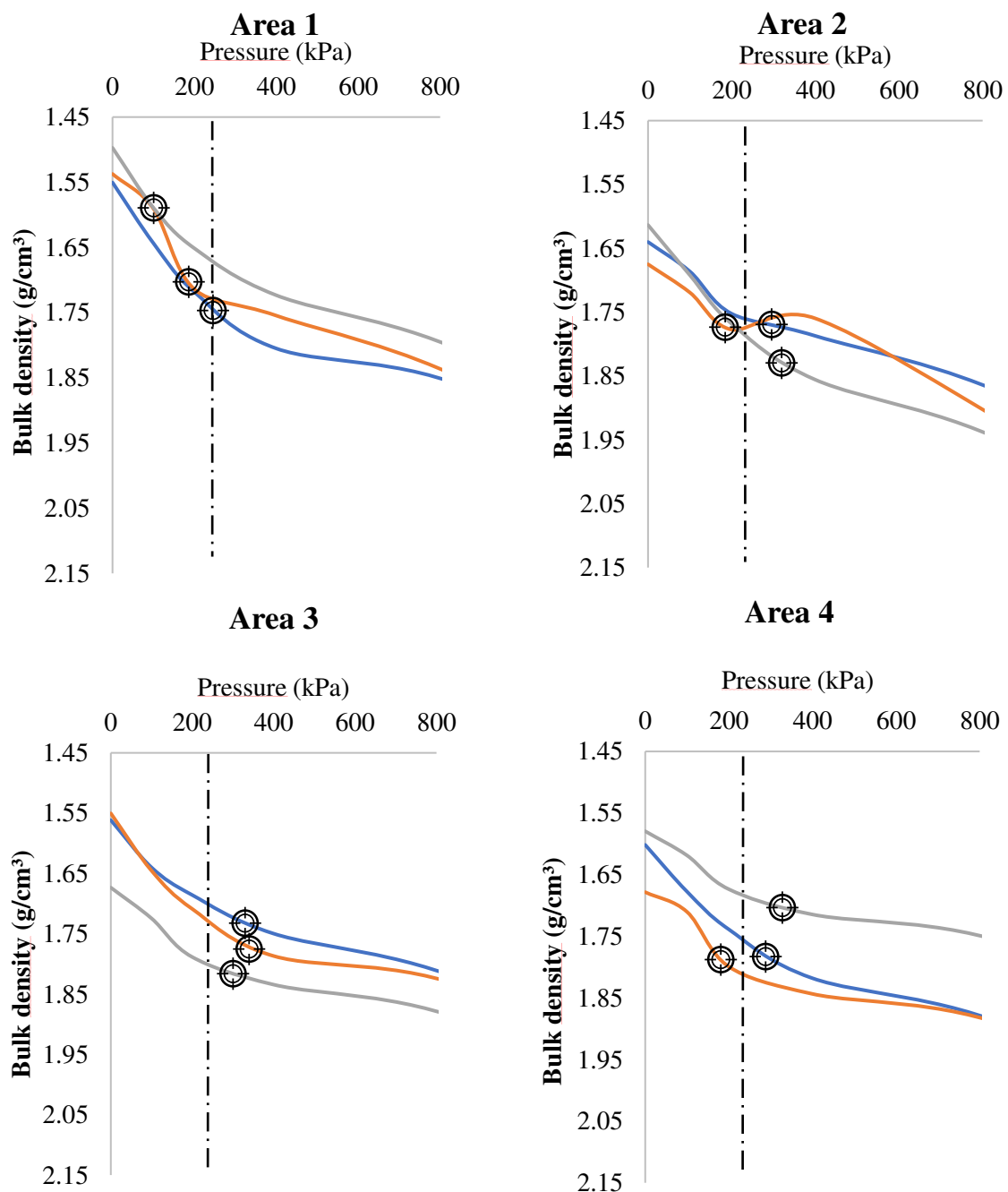
Tabela 5. Densidade do solo em três profundidades para seis áreas utilizadas pela colheita florestal

Área	Densidade (g/cm ³)		
	0-20cm	20-40cm	40-60cm
1	1,55 Aa	1,53 Aa	1,50 Aa
2	1,64 Aa	1,67 Ba	1,61 Aa
3	1,56 Aa	1,60 Aa	1,62 Aa
4	1,60 Aa	1,68 Ba	1,58 Aa
5	1,58 Aa	1,64 Ba	1,68 Aa
6	1,74 Ba	1,70 Ba	1,75 Ba

Legenda: Médias seguidas da mesma letra minúscula nas linhas e maiúscula nas colunas, dentro de cada atributo, não diferem entre si a 5 % pelo teste de Scott-Knott.

De acordo com o teste Scott-Knott executado, não houve diferença estatística dentro das áreas para a densidade, a verossimilhança dentro das áreas pode ser explicada pelo teor de areia na constituição do solo (BLANCO-CANQUI, 2017; MARTINS *et al.*, 2018). A área 1 apresentou menor D_s em relação as demais áreas; e a área 6 apresentou a maior D_s .

As maiores diferenças nas características físicas do solo foram observadas nos parâmetros para a camada superior, devido a maior densidade nessas áreas, ocorre uma redução da porosidade e, conseqüentemente, da umidade; e isso diminui o espaço dos poros e aumenta a força de atrito entre as partículas do solo, modificando o rearranjo das partículas e aumentando a densidade (DAVEIGA *et al.*, 2007; WATANABE *et al.*, 2017).



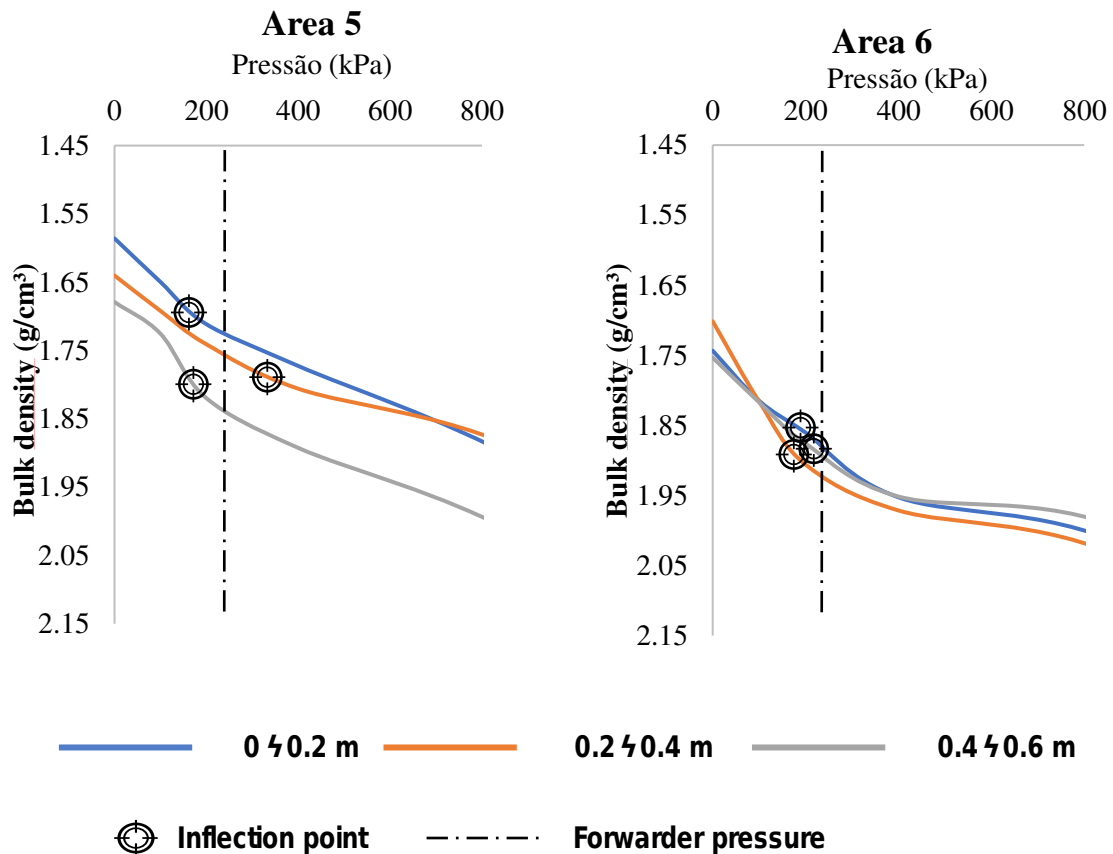


Figura 3. Modelos da capacidade de suporte de carga para diferentes áreas e classes de texturas em camadas de 0–20, 20–40 e 40–60 cm.

Todas as áreas apresentaram altas densidades em todas as profundidades. No perfil do solo observa-se que as camadas demonstram variabilidade sobre a compressão e densidade máxima. A área 6 apresenta uma maior densidade a 220 kPa (1,94 g/cm³), e as áreas 2, 4 e 5 evidenciaram densidade de 1,8 g/cm³. Já as áreas 1 e 3 obtiveram densidades médias de 1,71 e 1,78 g/cm³, respectivamente. Em áreas agrícolas as densidades variam de 0,98 g/cm³ até 1,74 g/cm³ devido ao tráfego de máquinas agrícolas (ARAÚJO *et al.*, 2011; REICHERT *et al.*, 2016), demonstrando a influência das propriedades físicas no solo como um fator restritivo ao desenvolvimento de culturas.

Entre 40 e 60 cm de profundidade, a densidade na pressão de 220 kPa, variou entre 1,67 a 1,94 g/cm³. As áreas 5 e 6 apresentaram maiores densidades a 60 cm comparadas as demais profundidades, evidenciando uma grande heterogeneidade do solo. Este fato pode ser atribuído a ausência de matéria orgânica do solo, visto que, práticas que aumentem o teor de carbono orgânico contribuirá para estabilizar a estrutura dos poros e aumentar a capacidade do solo de suportar cargas da máquina sem colapso (BHATTACHARYYA *et al.*, 2006; USOWICZ *et al.*, 2016; FERNÁNDEZ *et al.*, 2019), por isso a importância de manter uma parte dos resíduos florestais no campo.

3.3. Grau de Compactação

O grau de compactação médio para áreas florestais (GC) (Tabela 6) apresentou diferenças entre as pressões e evidenciou o efeito da pressão das máquinas de colheita florestal no solo. Verifica-se que os valores médios de GC da área em estudo (103%) está acima do intervalo de valores estipulados na literatura como ideais para o máximo rendimento das culturas, estimados entre 77 e 94 % (BETIOLI-JÚNIOR *et al.*, 2012).

A função de previsão para a densidade de referência usada é com base em dados que cobrem uma ampla variedade de texturas do solo e concentrações de matéria orgânica, semelhante ao utilizado por NADERI-BOLDAJI e KELLER (2016).

Tabela 6. Grau de compactação médio a 200 kPa em diferentes profundidades e pressões em áreas florestais

Pressão	0-20 (%)	20-40 (%)	40-60 (%)
0	91,58 Aa	91,77 Aa	92,19 Aa
100	95,80 Ba	95,48 Ba	96,47 Ba
200	99,40 Ba	100,23 Ca	100,36 Ba
400	103,00 Ca	102,20 Ca	104,32 Ca
800	108,03 Da	108,96 Da	109,68 Da

Legenda: Médias seguidas da mesma letra minúscula nas linhas e maiúscula nas colunas, dentro de cada atributo, não diferem entre si a 5 % pelo teste de Scott-Knott. %; porcentagem de compactação.

Carter (1990) salienta que, na faixa de GC entre 84 e 89 %, o volume de macroporos varia de 13,5 a 10,0 %, indicando não haver limitações físicas às plantas por aeração.

Dentro das áreas não houve diferença significativa do Grau de Compactação evidenciando o comportamento semelhante independente da profundidade. A pressão de 800 kPa obteve um Grau de Compactação de 124,84 % em relação a densidade de referência (1,70 g/cm³), valor alto, se considerar que para culturas agrícolas o máximo encontrado é de 95%. O maior grau de compactação em áreas florestais demonstra a intensa movimentação de máquinas, causando uma grande alteração das propriedades físicas, comprometendo sua estrutura e capacidade de desenvolvimento de cultura após a colheita e extração.

4.0. CONCLUSÃO

1. Associado a capacidade de suporte do solo, o harvester degrada o solo, aumentando a compactação, causando incremento na resistência do solo a penetração e densidade. O forwarder causa maiores danos em relação ao harvester, causando deformações plásticas no solo.
2. As áreas 5 e 6 apresentam maiores densidades máximas do solo em profundidade, evidenciando maior transferência de energia e mais susceptíveis para a compactação do solo, tendo maior degradação das áreas na atividade de colheita, sendo necessária maiores atenções com as operações.
4. O aumento do grau de compactação leva à redução da porosidade total e aumento da densidade, que ao atingir 100% do grau de compactação, causa danos irreversíveis ao solo.
5. A umidade do solo e a textura tem influência direta na capacidade de suporte, sendo necessário o monitoramento para alcançar a excelência operacional e reduzir os danos das operações florestais.

5.0. REFERÊNCIAS

ARAÚJO, J.C.F.; DIAS, J.M.D.S.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALCÂNTARA, E.N. Capacidade de suporte de carga e umidade crítica de um Latossolo induzida por diferentes manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 115-131, 2011.

ASSIS, P.C.R.; STONE, L.F.; MEDEIROS, J.C.; MADARI, B.E.; OLIVEIRA, J, MOLIVEIRA, J.M.; WRUCK, F.J. Atributos físicos do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, p. 309-316. 2015.

BETIOLI-JÚNIOR, E.; MOREIRA, W.H.; TORMENA, C.A.; FERREIRA, C.J.B.; SILVA, Á.P.D.; GIAROLA, N.F.B. Least Limiting Water Range and Degree of Soil Compaction of an Oxisol After 30 Years of No Tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 971-982, 2012.

BHATTACHARYYA, R.; PRAKSH, V.; KUNDU, S.; GUPTA, H.S. Effect of tillage and crop rotations on pore size distribution and soil hydraulic conductivity in sandy clay loam soil of the Indian Himalayas. **Soil and Tillage Research**, v. 86, p. 129–140, 2006.

BLANCO-CANQUI, H. Biochar and soil physical properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 81, n. 4, p. 687-711, 2017.

CARNEIRO, M.A.C.; SOUZA, E.D.; REIS, E.F.; PEREIRA, H.S.; AZEVEDO, W.R. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, p. 147-157, 2009.

CARTER, M.R. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. **Can. J. Soil Sci.**, v. 70, p. 425-433, 1990.

CARVALHO, L.A.; NETO, V.J.M.; SILVA, L.F.; PEREIRA, J.G.; NUNES, W.A.G.A.; CHAVES, C.H.C. Resistência mecânica do solo à penetração (RMP) sob cultivo de cana-de-açúcar, no município de Rio Brilhante- MS. **Agrarian**, v. 1, p. 7-22, 2008.

DAVEIGA, M.; HORN, R.; REINERT, D.; REICHERT, J. Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. **Soil and Tillage Research**, v. 92, p.104–113, 2007. <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.still.2006.01.008>

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2011) **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Dados eletrônicos. 2ª ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos. 230p.

FERNÁNDEZ, J.F.; RUBIN, L.; HARTMANN, P.; PUHLMANN, H.; VON WILPERT, K. Initial recovery of soil structure of a compacted forest soil can be enhanced by technical treatments and planting. **Forest Ecology and Management**, v. 431, p. 54-62, 2019.

GONÇALVES, A.D.M.A.; LIBARDI, P.L. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 1174-1184, 2013.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. (Brasil). Ano base 2019. **Relatório 2020**. Brasília, 2020. 66 p.

LIMA, R.P.; LEÓN, M.J.; SILVA, A.R. Compactação do solo de diferentes classes texturais em áreas de produção de cana-de-açúcar. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 60, n. 1, p. 16-20, fev. 2013.

MACHADO, C.C.; LOPES, E.S. Análise da influência do comprimento de toras de eucalipto na produtividade e custo da colheita e transporte florestal. **Revista Cerne**, v. 6, n. 2, p. 124-129, 2000.

MARCHÃO, R.L.; BALBINO, L.C.; SILVA, E.M.; SANTOS, J.D.G.; SÁ, M.A.C.; VILELA, L.B.T. Qualidade física de um Latossolo Vermelho sob sistemas de integração lavoura-pecuária no Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 6, p. 873-882, 2007.

MARTINS, P.C.C.; DIAS, J.M.D.S.; AJAYI, A.E.; TAKAHASHI, E.N.; TASSINARI, D. Soil compaction during harvest operations in five tropical soils with different textures under eucalyptus forests. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 42, n. 1, p. 58-68, 2018.

NADERI-BOLDAJI, M.; KELLER, T. Degree of soil compactness is highly correlated with the soil physical quality index S. **Soil and Tillage Research**, v. 159, p. 41-46, 2016.

REICHERT, J.M.; ROSA, V.T.; VOGELMANN, E.S.; ROSA, D.P.; HORN, R.; REINERT, D.J.; DENARDIN, J.E. Conceptual framework for capacity and intensity physical soil properties affected by short and long-term (14 years) continuous no-tillage and controlled traffic. **Soil and Tillage Research**, v. 158, p. 123-136, 2016.

REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; HORN, R.; HÅKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, v. 102, n. 2, p. 242-254, 2009.

RESENDE, A.S.; DIAS, J.M.S.; LEITE, F.P. Avaliação da intensidade de tráfego e carga de um forwarder sobre a compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo. **Revista Árvore**, v. 35, n. 3, p. 547-554, 2011.

RODRIGUES, C.K.; DA SILVA LOPES, E.; MÜLLER, M.M. Avaliação da qualidade estrutural do solo em colheita mecanizada (harvester e forwarder) de *Eucalyptus grandis*. **Agrarian**, v. 13, n. 47, p. 56-62, 2020.

SANTOS, L.N.; FERNANDES, H.C.; SILVA, R.M.F.; SILVA, M.L.; SOUZA, A.P. Avaliação de custos do *harvester* no abate e processamento de madeira de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 41, n. 5, p. 1-9, 2017.

SCHETTINO, S.; MINETTE, L.J.; SOUZA, A.P. Correlação entre volumetria de florestas de eucalipto e produtividade e custos de máquinas de colheita de madeira. **Revista Árvore**. Viçosa, v. 39, n. 5, p. 935-942, 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/0100-67622015000500016>.

SILVA, A.R.; DIAS, J.M.D.S.; GUIMARÃES, P.T.G.; ARAÚJO, C.F. Modelagem da capacidade de suporte de carga e quantificação dos efeitos das operações mecanizadas em um

Latossolo Amarelo cultivado com cafeeiros. **Revista Brasileira de ciência do Solo**, v. 30, n. 2, p. 207-216, 2006.

SILVA, A.R.; DIAS, J.M.S.; LEITE, F.P. Avaliação da intensidade de tráfego e carga de um forwarder sobre a compactação de um Latossolo Vermelho-amarelo. **Revista Árvore**, v. 35, n. 3, p. 547-554, 2011.

SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Suscetibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.239-249, 2000

SUZUKI, L.E.A.S.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; LIMA, C.L.R. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 8, p. 1159-1167, 2007.

SZYMCZAK, D.A.; BRUN, E.J.; REINERT, D.J.; FRIGOTTO, T.; MAZZALIRA, C.C.; LÚCIO, A.D.; MARAFIGA, J. Compactação do solo causada por tratores florestais na colheita de Pinus taeda l. na região sudoeste do paraná. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 38, n. 4, p. 641-648, 2014.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 22, n. 4, p. 573-581, 1998.

USOWICZ, B.; LIPIEC, J.; ŁUKOWSKI, M.; MARCZEWSKI, W.; USOWICZ, J. The effect of biochar application on thermal properties and albedo of loess soil under grassland and fallow. **Soil and Tillage Research**, v. 164, p. 45–51. 2016. <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.still.2016.03.009>

WATANABE, R.; FIGUEIREDO, G.C.; SILVA, Á.P.D.; NEVES, J.C.L.; OLIVEIRA, T.S.D. Soil Compressibility under Irrigated Perennial and Annual Crops in a Semi-Arid Environment. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, p. 1-17, 2017.

RESUMO

NUNES, Ítalo Lima, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2021. **Variabilidade da compactação do solo em função do tráfego da colheita florestal.** Orientador: Luciano José Minette.

O setor florestal tem suprido uma grande demanda de madeira nos últimos anos, necessitando maior mecanização, excelência operacional e sustentabilidade das operações. O efeito do tráfego das máquinas de colheita sobre o solo altera as propriedades físicas, causando degradação do solo. Objetivou-se avaliar a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo após a operação de corte com o *harvester* e em função das passadas do *forwarder* (0, 1, 3, 5 e 7). O estudo foi realizado em duas áreas do município de Itanagra e Entre Rios no estado da Bahia. As amostras foram coletadas em três camadas (0,0-0,20 m; 0,20-0,40 m; 0,40-0,60 m), avaliou-se a porosidade total, densidade do solo e resistência do solo à penetração. O índice de dependência espacial foi moderado para todas as variáveis da área 1 e 2. A colheita com o *harvester* e as passadas do *forwarder* alteraram a resistência do solo, sendo maior alteração no solo de textura franco-argilo-arenosa. A 7ª passada do *forwarder* gerou o pico da resistência, alterando a capacidade de recuperação do solo causando compactação adicional.

Palavras-chave: Geoestatística. Compactação. Cut-to-length

ABSTRACT

NUNES, Ítalo Lima, M.Sc., Federal University of Viçosa, February 2021. **Variability of soil compaction as a function of forest harvest traffic.** Advisor: Luciano José Minette.

The forestry sector has met a great demand for wood in recent years, requiring greater mechanization, operational excellence and sustainability of operations. The effect of harvesting machine traffic on the soil alters physical properties, causing soil degradation. The objective was to evaluate the spatial variability of the physical attributes of the soil after the cutting operation with the harvester and as a function of the forwarder's steps (0, 1, 3, 5 and 7). The study was carried out in two areas in the municipality of Itanagra and Entre Rios in the state of Bahia. The samples were collected in three layers (0.0-0.20 m; 0.20–0.40 m; 0.40–0.60 m), total porosity, soil density and soil resistance were evaluated penetration. The spatial dependency index was moderate for all variables in area 1 and 2. Harvesting with the harvester and forwarder strides changed the soil resistance, with a greater change in the loam-clay-sandy soil. The 7th pass of the forwarder generated the peak of resistance, changing the soil's recovery capacity causing additional compaction.

Keywords: Geostatistics. Compaction. Cut-to-legth

CAPÍTULO II- VARIABILIDADE DA COMPACTAÇÃO DO SOLO EM FUNÇÃO DO TRÁFEGO DA COLHEITA FLORESTAL

1.0. INTRODUÇÃO

A colheita mecanizada em florestas plantadas aumentou a qualidade e produtividade da colheita, segurança aos operadores e redução dos custos (PEREIRA *et al.*, 2015; RODRIGUES *et al.*, 2020). As máquinas possuem massas brutas de até 55.000 kg e, portanto, têm um alto potencial para causar distúrbios no solo na forma de compactação e deslocamento do solo durante operações florestais (LABELLE; JAEGER, 2011; PROTO *et al.*, 2018).

Quanto maior a movimentação de máquinas nas áreas, maior é a degradação do solo, diminuindo o tamanho e o volume dos poros do solo e alterando suas propriedades físicas, principalmente a resistência do solo a penetração (NAGHDI *et al.*, 2016).

O efeito do tráfego sobre o solo é maior nas primeiras passadas, e o aumento na resistência do solo a penetração nas trilhas de tráfego está relacionado com o número de passadas, o tipo de rodado e o tipo de máquina utilizada no sistema de colheita, onde o incremento da compactação do solo pode aumentar em torno de 80% (LOPES *et al.*, 2006; SEIXAS; SOUZA, 2007). Lopes *et al.* (2011), verificaram que o tráfego das máquinas de colheita da madeira causou alterações na resistência à penetração mesmo nas maiores profundidades do solo, demonstrando que a variabilidade dos atributos físicos do solo ocorre mais intensamente nas camadas de 0,20 até 0,40 metros.

O estudo das propriedades físicas do solo torna-se viável para identificar com precisão o perfil, caracterizando as propriedades de resistência do solo a penetração (RSP), densidade do solo (Ds) e porosidade, permitindo avaliar os impactos causados pela colheita florestal e passadas do forwarder na extração da madeira. As alterações físicas são inevitáveis devido as operações mecanizadas e variam em intensidade e distribuição espacial como resultado da interação entre os fatores da máquina e do local da colheita, e especialmente a extração (SOLGI *et al.* 2018).

A variabilidade espacial estuda como ocorre a variação das propriedades físicas do solo, que é de forma vertical e horizontal nas propriedades do solo. Para monitorar a variabilidade maior é necessária uma maior quantidade de informações, as quais podem ser obtidas a partir de operações de amostragem. A previsão de valores em locais não amostrados pode ser feita por critérios geoestatísticos, considerando a correlação espacial entre estimativa e pontos amostrados para redução do erro (PERALTA *et al.*, 2015; BEHERA *et al.*, 2018).

Para avaliar as características físicas, pode-se utilizar a geoestatística, que é uma ferramenta voltada para prover informações em suporte de agricultura e floresta de precisão,

realizando a caracterização e a modelagem espacial, das quais resultam a produção de mapas precisos para bases de informação da área, permitindo monitorar os atributos do solo e subsidiar o microplanejamento com tomadas de decisão (MCBRATNEY *et al.*, 2005; BARRIOS *et al.*, 2015).

Com o intuito de compreender o processo de compactação do solo pela colheita e extração florestal, objetivou-se com este estudo avaliar a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo em função do corte com o harvester e tráfego do forwarder.

2.0. METODOLOGIA

2.1. Caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado entre fevereiro e março de 2020 em duas áreas, nos municípios de Itanagra e Entre Rios no estado da Bahia (Figura 1). Os solos das áreas estudadas foram classificados como Argissolo Amarelo Distrófico coeso fragipânico (área 1) e Argissolo Amarelo Distrófico coeso (área 2). Onde foram realizadas as operações de colheita e extração de madeira em povoamentos de *Eucalyptus* spp. De acordo com o sistema de classificação Köppen, o clima da área 1 é classificado como Af (tropical úmido ou super úmido, em estação seca), precipitação média de 1792 mm/ano. O clima da área 2 é classificado como Af e precipitação média de 1050 mm/ano.

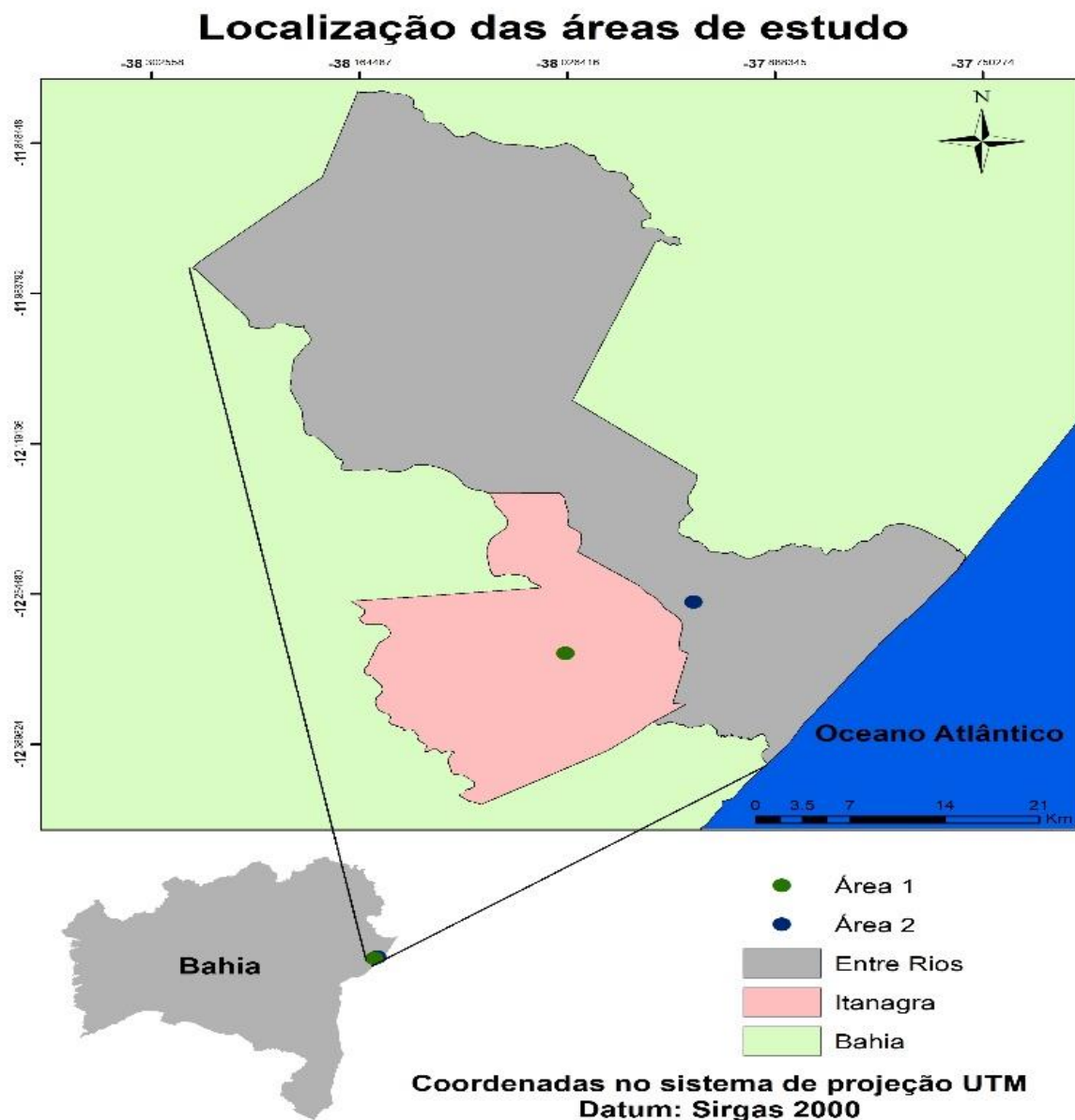


Figura 1– Localização das áreas de estudo.

Tabela 1 - Composição granulométrica do solo para as áreas em estudo.

Área	Profundidade	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila	Classificação (SBCS)
		Kg/Kg ⁻¹				
1	0-20	0,29	0,223	0,023	0,464	Argilo-Arenosa
	20-40	0,31	0,203	0,03	0,457	Argilo-Arenosa
	40-60	0,325	0,188	0,038	0,449	Argilo-Arenosa
2	0-20	0,287	0,38	0,038	0,295	Franco-Argilo-Arenosa
	20-40	0,291	0,371	0,025	0,313	Franco-Argilo-Arenosa
	40-60	0,295	0,362	0,012	0,331	Franco-Argilo-Arenosa

Em que: SBCS, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo

2.2. Coleta dos dados

Para avaliação dos atributos, foram coletadas amostras deformadas com o auxílio de um trado holandês e amostras indeformadas com o extrator de solo tipo “Umland”, utilizando-se anéis cilíndricos de aço com bordas cortantes e volume de 3,7 cm³. As amostras foram coletadas em três camadas (0,0-0,20 m; 0,20–0,40 m; 0,40–0,60 m). Os atributos físicos avaliados pelas amostras indeformadas foram: porosidade total (PT) e densidade do solo (Ds) com determinação de acordo Embrapa, 2011.

2.4. Sistema de colheita

O sistema de colheita avaliado foi o de toras curtas (*cut-to-length*), com corte e processamento realizados por uma colhedora *Harvester* (Hv) da marca *Komatsu*, modelo PC200F, peso de 22.9000 kg e rodados de esteiras. A extração da madeira foi realizada por *Forwarder* da marca *Komatsu*, modelo 895, peso 20.700 kg, rodados de pneus e volume médio da carga de 15 m³ trafegando sobre os resíduos de corte e processamento da madeira.

O ensaio constituiu pela avaliação pré-tráfego, pós-tráfego do harvester e pós-tráfego do forwarder (até 7 passadas) em função das profundidades do solo (0,0-0,20 m; 0,20–0,40 m; 0,40–0,60 m) com 12 repetições, sendo seis coletadas na linha de tráfego do rodado da máquina.

2.3. Resistência do solo a penetração

A resistência do solo à penetração foi determinada em quilopascal (kPa) com registro automático a cada 0,01 m de profundidade, obtido com o medidor automático de compactação do solo, marca FALKER, modelo SOLO STAR, equipado com uma ponta em forma de cone (ASAE, 2003).

2.5. Variabilidade espacial

Nas análises das distribuições espaciais e semivariogramas, foi utilizado o software GS+, versão 5.1 (ROBERTSON, 1998). Para modelar os padrões espaciais do volume por meio da determinação das semivariâncias (Equação 1), e considerou-se o posicionamento geográfico

dos indivíduos georreferenciados nas unidades amostrais no campo, e o posterior cômputo das distâncias (h) e das diferenças numéricas da variável (Z) na malha de pontos.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i+h) - Z(x_i)]^2 \quad (\text{Eq. 1})$$

Em que: (h) = semivariância da variável $Z(x_i)$; h = vetor de distância euclidiana; e $N(h)$ = número de pares de pontos medidos $Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$, separados por uma distância h .

O índice de dependência espacial (IDE) foi classificado de acordo com o efeito pepita e patamar, sendo: dependência espacial forte < 25%; dependência espacial moderada entre 25% e 75% e dependência espacial fraca quando o IDE é > 75% (CAMBARDELLA *et al.*, 1994). Este índice possibilita a comparação do tamanho relativo do efeito pepita entre os atributos dado pela Equação 2:

$$\text{IDE} = \frac{\gamma(h)_{\text{pepita}}}{\gamma(h)_{\text{total}}} * 100 \quad (\text{Eq. 2})$$

Em que: IDE - Índice de dependência espacial, $\gamma(h)$ pepita - semivariância do efeito pepita e $\gamma(h)$ total - semivariância total ou patamar.

Os parâmetros utilizados para a escolha do melhor modelo (esférico, exponencial, quadrático, linear e não linear) foram o alcance (Ao), índice de dependência espacial (IDE), patamar (Co) e efeito pepita (Co+C), observados nos semivariogramas. Após a análise dos semivariogramas foram gerados os mapas de isolinhas para as variáveis em estudo.

3.0. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Semivariograma

O modelo que melhor se ajustou foi o exponencial devido a maior perda de semelhança com a distância (Tabela 2).

A relação entre o efeito pepita e patamar resulta no índice de dependência espacial (IDE) que foi moderado para todas as variáveis da área 2. Resultado semelhante foi encontrado por Lima *et al.* (2008) em estudo sobre a RSP em área florestal. As variáveis que destacaram dependência espacial moderada é de homogeneização do solo (BHUNIA; CHATTOPADHYAY, 2018).

O alcance médio de 649,69 metros foi maior que a distância amostral entre os pontos (20 cm), comprovando a continuidade espacial dos dados, validando a malha amostral e número de pontos adotados (BORŮVKA *et al.*, 2007; WADOUX *et al.*, 2018; NUNES *et al.*, 2020). A interpolação mostrou-se aplicável para a tomada de decisões, gerando mapas com variações precisas.

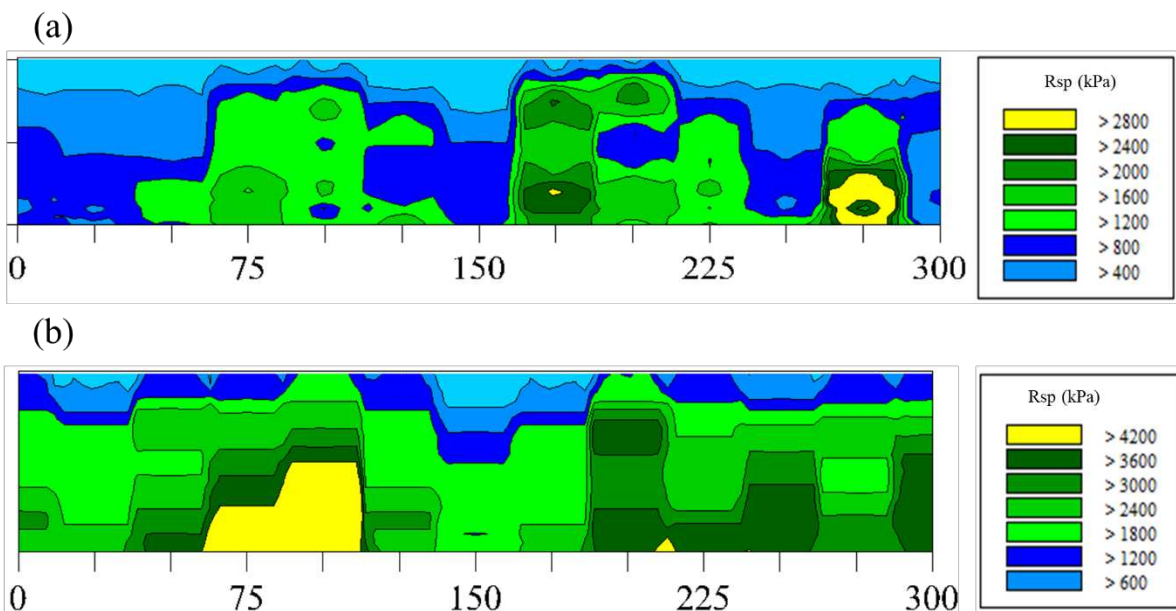
Tabela 2: Parâmetros dos modelos geoestatísticos selecionados para as variáveis; Rsp, Ds e Pt em duas áreas florestais.

Variável	Operação	Modelo	Co *	Co+C *	Ao (m)	IDE (%)
Área 1						
Rsp	Pré-corte	Exponencial	1000,000	2390,000 **	49,50	50,00
Ds	Pós-corte	Exponencial	1,400	2,700	1532,70	50,00
Pt	Pós-corte	Exponencial	0,05	0,11	491,30	54,00
Rsp	Pós-corte	Exponencial	1000,000	501,200 **	53,10	50,00
Área 2						
Rsp	Pré-corte	Exponencial	766,000 **	15330,000 **	1438,51	50,00
Ds	Pós-corte	Exponencial	1,200	2,400	721,15	51,00
Pt	Pós-corte	Exponencial	0,060	0,120	220,20	50,00
Rsp	Pós-corte	Exponencial	1321,000 **	2643,000 **	972,91	50,00

Co - Efeito Pepita; Co+C - Patamar; Ao - Alcance; IDE - Índice de dependência espacial; Rsp - Resistência do solo a penetração das raízes; Ds - Densidade do solo; Pt - Porosidade total; (*) kPa para Rsp; g/cm³ para Ds; m³/m³ para Pt; (**) * 10³.

3.2. Resistência do solo a penetração

A distribuição espacial para a resistência do solo à penetração (RSP), e todos os locais de fechamento do solo (0 a 5 cm) apresentaram valores claramente mais baixos em relação as camadas mais profundas do solo (figura 2).



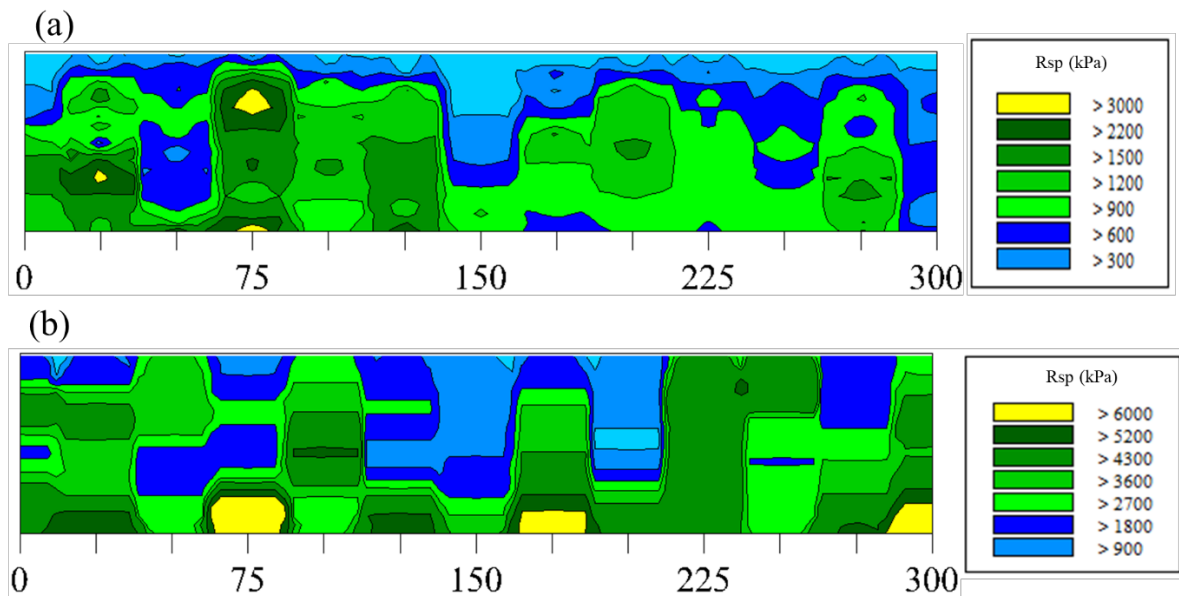
Em que: (a) - área 1, pré colheita; (b) - área 1, pós colheita. Transecto da distribuição espacial em centímetros.

Figura 2: Fonte: Autor. Distribuição espacial da Resistência do solo à penetração das raízes (Rsp - Kpa) antes da colheita florestal em duas áreas.

Após a colheita, ocorre grandes alterações sobre a Rsp (Figura 3), onde verifica-se um aumento gerando da RSP, causando impedimento ao desenvolvimento de brotos em áreas de condução (PREVEDELLO *et al.*, 2013). A área 1 apresentou locais com Rsp superior a 6000

kPa, um valor muito superior em relação a área 2, que foi de 4800 kPa. Isso ocorre devido a faixa argilosa do solo, que com a colheita, teve a sua macro e microporosidade reduzida, contribuindo para um significativo aumento da variável em estudo. Em ambas as áreas, a compressão realizada foi degradante. Os valores em estudo são superiores comparados ao encontrado por Colombi *et al.* (2018) que foi de 3000 kPa em cultura agrícola, correspondendo em 55% da RSP média das áreas florestais avaliadas no presente estudo, evidenciando a degradação exercida pelas máquinas florestais.

Mesmo após a passada do Hv, é possível identificar no transecto onde foi realizada a subsolagem para o plantio inicial (150 cm), que não há grandes alterações no local devido aos rodados, que não deslocam sobre as linhas de plantio, mas sempre nas entrelinhas.



Em que: (a) – área 2, pré colheita; (b) – área 2, pós colheita. Transecto da distribuição espacial em centímetros.

Figura 3: Fonte: Autor. Distribuição espacial da Resistência do solo a penetração das raízes (Rsp – Kpa) após a colheita florestal em duas áreas.

A área 2 apresentou maiores RSP, principalmente nas camadas profundas (0,4 a 0,6 m) com picos de 5000 kPa, valores acima do ideal para o desenvolvimento das raízes de acordo (GRABLE; SIEMER, 1968; NASCIMENTO *et al.*, 2019), que observaram 2500 kPa como limite de desenvolvimento das raízes.

3.3. Modelagem da RSP submetido ao tráfego do forwarder

Para o forwarder, quanto maior o número de passadas, ocorre um maior incremento da RSP. Não houve um aumento significativo da RSP com a primeira passada, sendo o incremento na ordem de 100 kPa; enquanto que, para a quinta passada, ocorreu um incremento de 920 kPa

em relação a primeira passada. A sétima passada resultou na RSP máxima, com picos acima de 3500 kPa.

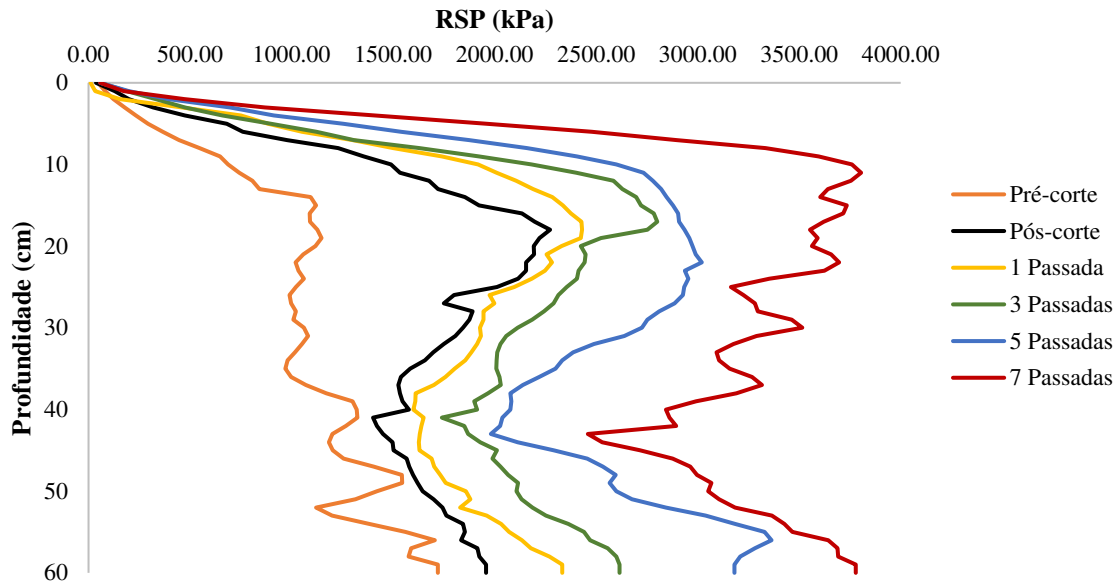


Figura 4. Perfis verticais da resistência do solo a penetração das raízes para área 1 em função da colheita e passadas do forwarder na camada de profundidade de 0-0,60m.

Han e colaboradores (2006) encontraram que a maior compactação do solo ocorre nas primeiras passagens das máquinas de colheita, causando a redução do crescimento radicular, limitando a raiz acesso à água e nutrientes, reduzindo o movimento da água, alterando o fluxo da superfície e gera aumento do potencial para erosão. A compactação demonstrou ter um impacto negativo a longo prazo no crescimento das árvores, principalmente nas trilhas principais, e áreas de extração de madeira em geral (CAMBI *et al.*, 2017; LABELLE *et al.*, 2019), demonstrando que o monitoramento dos atributos físicos do solo pode auxiliar o microplanejamento.

A colheita resultou em aumento médio de 680 kPa com a passada do Hv, porém nas camadas entre 0,2 m e 0,4 m o incremento foi de 1000 kPa (Figura 4 e 5). O aumento excessivo da RSP pode resultar em perdas de carbono do solo (MIKA; KEETON, 2013) e alterações na biota do solo biota do solo, comprometendo a estrutura do sistema, devido a biota do solo se estabelecer majoritariamente nas camadas superficiais, causando degradação (LEWANDOWSKI *et al.*, 2019).

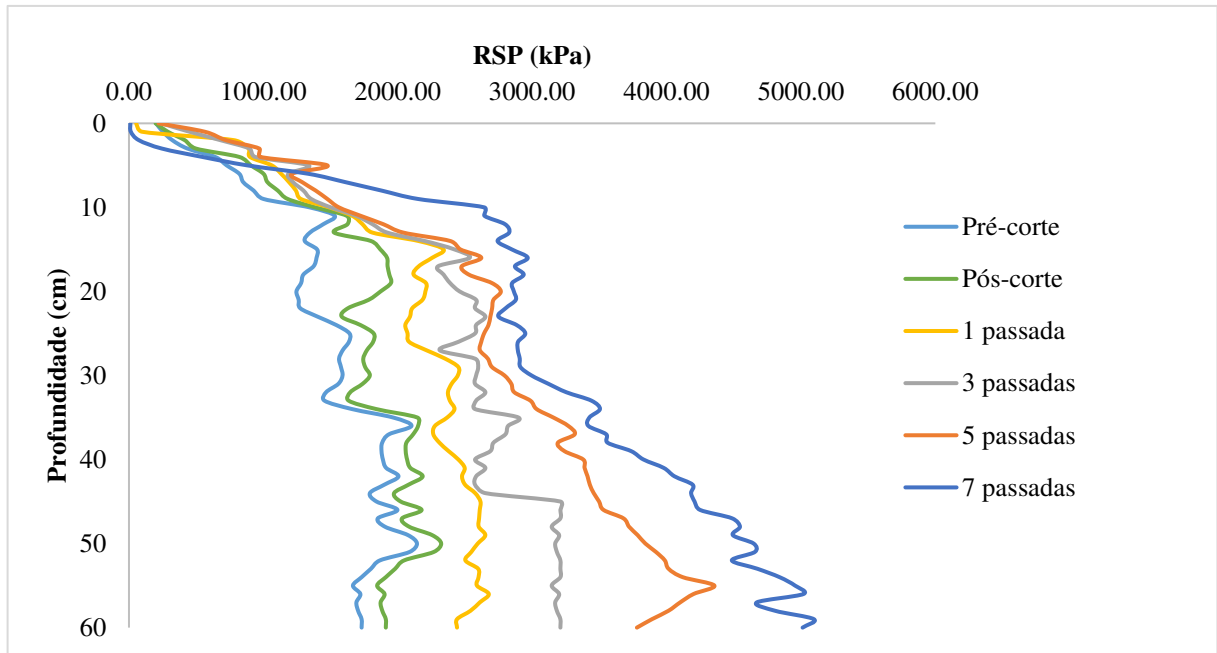
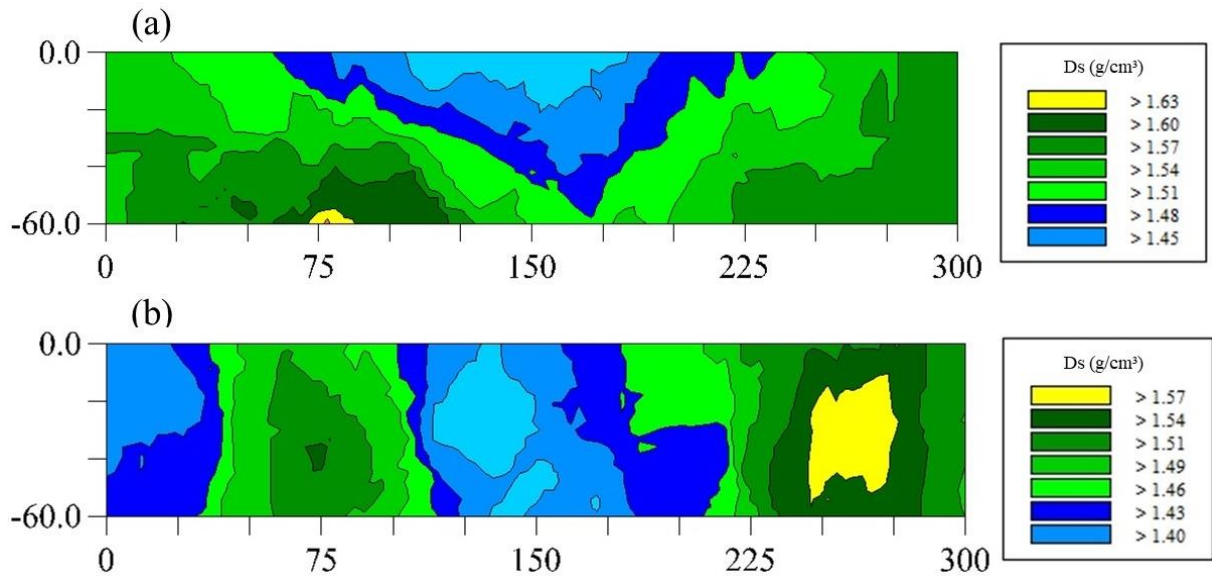


Figura 5. Perfis verticais da resistência do solo a penetração das raízes para área 2 na camada de profundidade de 0-0,60m.

3.3. Densidade do solo

A área 1 (a) apresentou maiores densidades em relação a área 2 (b) (Figura 4), isso devido a granulometria do solo, que por ser argilo-arenosa, permite um arranjo entre as partículas, aumentando a densidade do solo. Em relação a solos arenosos (b), observa-se o efeito da subsolagem no solo, com o típico formato de “V” no solo, devido o trincamento realizado pela haste do subsolador, evidenciando a capacidade do preparo de solo em alterar as propriedades físicas do solo, permitindo assim, o desenvolvimento em altura e diâmetro de espécies florestais.



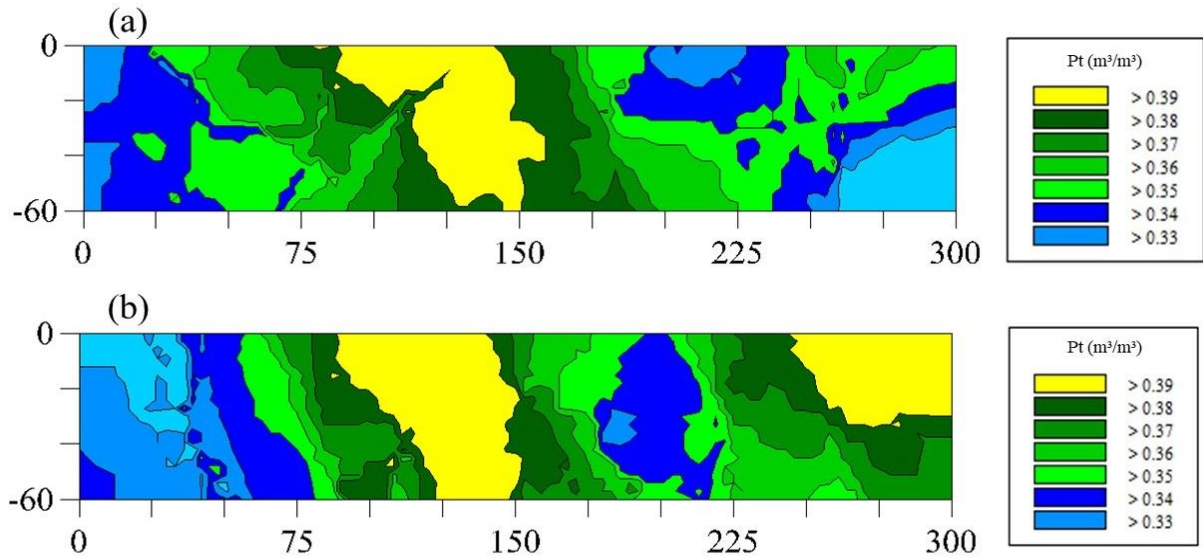
Em que: (a) – área 1; (b) – área 2. Transecto da distribuição espacial em centímetros.

Figura 4: Fonte: Autor. Distribuição espacial da densidade (D_s – g/cm^3) antes da colheita florestal em duas áreas.

A camada de 30 a 60 cm possui maior densidade em relação a sub-superfície do transecto, e resultado semelhante foi encontrado por Fernández *et al.*, (2019). A área 1, apresentou densidade média de $1,45 \text{ g/cm}^3$, valor abaixo ao da área 2, de $1,54 \text{ g/cm}^3$, evidenciando que mesmo possuindo uma textura arenosa, apresenta uma maior densidade devido a reorganização das partículas ao longo do perfil do solo (SOUZA *et al.*, 2016). As menores densidades observadas na camada mais superficial podem estar relacionadas à maior densidade de raízes das culturas utilizadas e ao maior teor de matéria orgânica (REINERT *et al.*, 2008). Maiores densidades podem afetar as plantas e seu metabolismo, com redução da fotossíntese, reduzindo a folhagem, área e crescimento de plantas (SOTO *et al.*, 2015).

3.4. Porosidade Total

A área 1 (a) tem distribuição similar a área 2(b) (figura 5). Os dados de porosidade total apresentaram uma tendência semelhante. A área 2 apresenta maior porosidade média total, de $0,36 \text{ (m}^3/\text{m}^3)$, um valor cerca de 5% maior que a área 1. Dentro da área 1, a porosidade total foi maior na entre linha em relação com a linha. Houve uma homogeneidade dentro da linha, onde a variação máxima foi de $0,18 \text{ (m}^3/\text{m}^3)$, valor menor que $0,45 \text{ (m}^3/\text{m}^3)$ de variação encontrada entre a linha de plantio. A distribuição do tamanho dos poros é muito importante, pois controla a infiltração, retenção e disponibilidade de água no solo (ALLMAN *et al.*, 2017; D'ACQUI *et al.*, 2020). A passagem das máquinas altera a composição dos poros do solo, causando grandes impactos, como aumento da densidade, redução da percolação de água e aumento da RSP.



Em que: (a) – área 1; (b) – área 2. Transecto da distribuição espacial em centímetros.

Figura 5: Fonte: Autor. Distribuição espacial da porosidade total ($P_t - m^3/m^3$) em duas áreas.

A textura árenosa da área 2 contribui significativamente para a porosidade total, visto que 80% de sua porosidade é composta de macroporos, que são os poros de drenagem rápida. Essa alta taxa é característica de solos arenosos que ocasionam maior condutividade hidráulica.

Quanto maior a porosidade, especificamente a macro, maior é a condutividade hidráulica do solo, que é a capacidade da água se movimentar no perfil. A densidade aparente e a porosidade total são, de fato, as variáveis que melhor explicam a compactação do solo. A extensão da compactação é geralmente avaliada em termos de densidade aparente e resistência do solo à penetração, entretanto o armazenamento de águas subterrâneas é altamente afetado pela porosidade do solo. A infiltração está conectada especificamente à permeabilidade da área (DONG *et al.*, 2018; SINGH *et al.*, 2020), mas é a distribuição do tamanho dos poros que controlam a infiltração, retenção e disponibilidade de água no solo.

4.0. CONCLUSÃO

A área 2 é mais propensa a compactação na colheita florestal, sendo necessário realizar planejamento operacional para reduzir os efeitos da compactação nas áreas mais susceptíveis a degradação física do solo, especialmente quando os valores de umidade estiverem elevados.

O índice de dependência espacial foi moderado para todas as variáveis da área 2, semelhante para a área 1, onde somente a RSP apresentou IDE fraco. Evidenciando que os parâmetros utilizados aliado com o alcance médio de 640 metros, foram suficientes para explicar as variações ocorridas dentro das áreas de estudo, validando a malha de pontos amostrais adotada.

As passadas do forwarder causaram as maiores alterações na resistência do solo a penetração, onde a área 2 apresentou áreas de até 5000 kPa de RSP.

5.0. REFERÊNCIAS

ALLMAN, M.; JANKOVSKÝ, M.; MESSINGEROVÁ, V.; ALLMANOVÁ, Z. Soil moisture content as a predictor of soil disturbance caused by wheeled forest harvesting machines on soils of the Western Carpathians. **Journal of forestry research**, v. 28, n. 2, p. 283-289, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11676-016-0326-y>

ASAE - American Society of Agricultural Engineers. ASAE EP542: Procedures for Using and Reporting Data Obtained with the Soil Cone Penetrometer. In: **ASAE Standards 2003: standards engineering practices data**. 46th ed. Saint Joseph, ASAE. p.1008- 1011, 2003.

BARRIOS, P.G.; BIDEGAIN, M.P.; GUTIÉRREZ, L. Effects of tillage intensities on spatial soil variability and site-specific management in early growth of *Eucalyptus grandis*. **Forest Ecology and Management**, v. 346, p. 41-50, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.02.031>

BEHERA, S.K.; MATHUR, R.K.; SHUKLA, A.K.; SURESH, K.; PRAKASH, C. Spatial variability of soil properties and delineation of soil management zones of oil palm plantations grown in a hot and humid tropical region of southern India. **Catena**, v. 165, p. 251-259, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.02.008>

BHUNIA, G.S.; SHIT, P.K.; CHATTOPADHYAY, R. Assessment of spatial variability of soil properties using geostatistical approach of lateritic soil (West Bengal, India). **Annals Of Agrarian Science**. p.1-8. 2018.

BORŮVKA, L.; MLÁDKOVÁ, L.; PENÍŽEK, V.; DRÁBEK, O.; VAŠÁT, R. Forest soil acidification assessment using principal component analysis and geostatistics. **Geoderma**, v. 140, n. 4, p. 374-382, 2007.

CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO, R.F.; KONOPKA, A.E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil science society of America journal**, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.

CAMBI, M.; HOSHIKA, Y.; MARIOTTI, B.; PAOLETTI, E.; PICCHIO, R.; VENANZI, R.; MARCHI, E. Compaction by a forest machine affects soil quality and *Quercus robur* L. seedling performance in an experimental field. **Forest Ecology and Management**, v. 384, p. 406-414, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2016.10.045>

COLOMBI, T.; TORRES, L.C.; WALTER, A.; KELLER, T. Feedbacks between soil penetration resistance, root architecture and water uptake limit water accessibility and crop growth—A vicious circle. **Science of the total environment**, v. 626, p. 1026-1035, 2018.

D'ACQUI, L.P.; CERTINI, G.; CAMBI, M.; MARCHI, E. Machinery's impact on forest soil porosity. **Journal of Terramechanics**, v. 91, p. 65-71, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2020.05.002>

DONG, S.; GUO, Y.; YU, X. Method for Quick Prediction of Hydraulic Conductivity and Soil-Water Retention of Unsaturated Soils. **Transportation Research Record**, v. 2672, n. 52, p. 108-117, 2018. <https://doi.org/10.1177/0361198118798486>

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2011) **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Dados eletrônicos. 2ª ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos. 230p.

FERNÁNDEZ, J.F.; RUBIN, L.; HARTMANN, P.; PUHLMANN, H.; VON WILPERT, K. Initial recovery of soil structure of a compacted forest soil can be enhanced by technical treatments and planting. **Forest Ecology and Management**, v. 431, p. 54-62, 2019.

GRABLE, A.R.; SIEMER, E.G. Effects of Bulk Density, Aggregate Size, and Soil Water Suction on Oxygen Diffusion, Redox Potentials, and Elongation of Corn Roots. **Soil Science Society of America Journal**, v. 32, n. 2, p.180. 1968. doi:10.2136/sssaj1968.0361599500320002001

HAN, H.S.; PAGE-DUMROESE, D.; HAN, S.K.; TIROCKE, J. Effects of slash, machine passes, and soil moisture on penetration resistance in a cut-to-length harvesting. **International journal of forest engineering**, v. 17, n. 2, p. 11-24, 2006. <https://doi.org/10.1080/14942119.2006.10702532>

LABELLE, E.R.; JAEGER, D. Soil compaction caused by cut-to-length forest operations and possible short-term natural rehabilitation of soil density. **Soil Science Society of America Journal**, v. 75, n. 6, p. 2314-2329, 2011.

LABELLE, E.R.; POLTORAK, B.J.; JAEGER, D. The role of brush mats in mitigating machine-induced soil disturbances: an assessment using absolute and relative soil bulk density and penetration resistance. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 49, n. 2, p. 164-178, 2019. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2018-0324>

LEWANDOWSKI, T.E.; FORRESTER, J.A.; MLADENOFF, D.J.; MARIN-SPIOTTA, E.; D'AMATO, A.W.; PALIK, B.J.; KOLKA, R.K. Long term effects of intensive biomass harvesting and compaction on the forest soil ecosystem. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 137, p. 107572, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107572>

LIMA, J.S de S.; OLIVEIRA, P.C.; De OLIVEIRA, R.B.; XAVIER, A.C. Geostatistic methods used in the study of soil penetration resistance in tractor traffic trail during wood harvesting. **Revista Árvore**, v. 32, n. 5, p. 931-938, 2008.

LOPES, E.D.S.; SAMPIETRO, J.A.; LOMBARDI, K.C.; DIAS, A.N. Avaliação da umidade na compactação do solo submetido ao tráfego de máquinas de colheita florestal. **Revista Árvore**, v. 35, n. 3, p. 659-667, 2011.

LOPES, S.E.; FERNANDES, H.C.; VIEIRA, L.B.; MACHADO, C.C.; RINALDI, P.C.N. Evaluation of compaction of a forest soil subjected to skidder traffic. **Revista Árvore**, v. 30, n. 3, p. 369-376, 2006.

MCBRATNEY, A.; WHELAN, B.; ANCEV, T.; BOUMA, J. Future directions of precision agriculture. **Precision agriculture**, v. 6, n. 1, p. 7-23, 2005.

MIKA, A.M.; KEETON, W.S. Factors contributing to carbon fluxes from bioenergy harvests in the US Northeast: an analysis using field data. **Gcb Bioenergy**, v. 5, n. 3, p. 290-305, 2013. <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2012.01183.x>

NAGHDI, R.; SOLGI, A.; LABELLE, E.R.; ZENNER, E.K. Influence of ground-based skidding on physical and chemical properties of forest soils and their effects on maple seedling growth. **European Journal of Forest Research**, v. 135, n. 5, p. 949-962, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10342-016-0986-3>.

NASCIMENTO, D.M.; CAVALIERI-POLIZELI, K.M.V.; SILVA, A.H.; FAVARETTO, N.; PARRON, L.M. Soil physical quality under long-term integrated agricultural production systems. **Soil and Tillage Research**, v. 186, p. 292–299. 2019. doi:10.1016/j.still.2018.08.016

NUNES, Í.L.; LEITE, E.S.; LIMA, R.J.; MINETTE, L.J.; SCHETTINO, S; DE SOUZA, A.P. Spatial variability of Eucalyptus clones in the function of soil tillage and fertilization. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 3, p. 12334-12349, 2020.

PERALTA, N.R.; COSTA, J.L.; BALZARINI, M.; FRANCO, M.C.; CÓRDOBA, M; BULLOCK, D. Delineation of management zones to improve nitrogen management of wheat. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 110, p. 103-113, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2014.10.017>

PEREIRA, A. L. N.; LOPES, E. S.; DIAS, N. A. Technical and cost analysis of feller buncher and skidder on wood harvesting in different stand productivity. **Ciência Florestal**, v. 25, n. 4, p. 981–989, 2015.

PREVEDELLO, J.; KAISER, D.R.; REINERT, D.J.; VOGELMANN, E.S.; FONTANELA, E.; REICHERT, J.M. SOIL Tillage and initial growth of Eucalyptus grandis Hill ex Maiden in Hapludalf. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 1, p. 129-138, 2013.

PROTO, A.R.; MACRÌ, G.; VISSER, R.; HARRILL, H.; RUSSO, D.; ZIMBALATTI, G. Factors affecting forwarder productivity. **European Journal of Forest Research**, v. 137, n. 2, p. 143-151, 2018.

REINERT, D.J.; ALBUQUERQUE, J.A.; REICHERT, J.M.; AITA, C.; ANDRADA, M.M.C. Bulk density critical limits for normal root growth of cover crops. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 5, p. 1805-1816, 2008.

ROBERTSON, G.P. GS+: Geostatistics for the environmental sciences: GS+ user's guide. Plainwell: **Gamma Design Software**, 1998. 152p.

RODRIGUES, C.K.; LOPES, E.S.; MÜLLER, M.M.L. Evaluation of soil structural quality in mechanized harvesting (harvester and forwarder) of Eucalyptus grandis. **Agrarian**, v. 13, n. 47, p. 56-62, 2020. <https://doi.org/10.30612/agrarian.v13i47.8484>

SEIXAS, F.; SOUZA, C.R. Evaluation and effect of soil compaction due to traffic frequency on eucalyptus wood production. **Revista Árvore**. v.31, n.6, p.1047-1052, 2007.

SINGH, V.K.; KUMAR, D.; KASHYAP, P.S.; SINGH, P.K.; KUMAR, A.; SINGH, S.K. Modelling of soil permeability using different data driven algorithms based on physical properties of soil. **Journal of Hydrology**, v. 580, p. 124223, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124223>

SOLGI, A.; NAGHDI, R.; LABELLE, E.R.; ZENNER, E.K. The effects of using soil protective mats of varying compositions and amounts on the intensity of soil disturbances caused by machine traffic. **International journal of forest engineering**, v. 29, n. 3, p. 199-207, 2018. <https://doi.org/10.1080/14942119.2018.1527174>

SOTO, D.P.; DONOSO, P.J.; SALAS, C.; PUETTMANN, K.J. Light availability and soil compaction influence the growth of underplanted *Nothofagus* following partial shelterwood harvest and soil scarification. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 45, n. 8, p. 998-1005, 2015. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2014-0353>

SOUZA, E.D.; FERNANDES FILHO, E.I.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BATJES, N.H.; SANTOS, G.R.D.; PONTES, L.M. Pedotransfer functions to estimate bulk density from soil properties and environmental covariates: Rio Doce basin. **Scientia agricola**, v. 73, n. 6, p. 525-534, 2016.

WADOUX, A.M.J.C.; BRUS, D.J.; HEUVELINK, G.B.M. Accounting for non-stationary variance in geostatistical mapping of soil properties. **Geoderma**, v. 324, p. 138-147, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.03.010>

CONCLUSÕES GERAIS

Os efeitos das operações florestais mecanizadas podem ser quantificados pelo modelo de capacidade de suporte de carga e seu uso permite associar os efeitos do tráfego na colheita florestal.

As máquinas florestais causam deformação acima do limite de elasticidade do solo. O forwarder causa a maior deformação plástica em relação ao harvester.

O grau de compactação pode ser utilizado para avaliar a condição física do solo. Os solos avaliados apresentaram alto grau de compactação (100%).

A malha de pontos geostatísticos adotado foi adequado apresentando alcance de 640 metros, podendo tomar decisões a nível de talhão.