

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**SUSCETIBILIDADE E PREDIÇÃO DA COMPACTAÇÃO DE SOLOS**  
**CULTIVADOS COM CANA-DE-AÇÚCAR EM PERNAMBUCO**

**Matheus Phelippe Santos Tolêdo**

**RECIFE**  
**FEVEREIRO DE 2020**

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**SUSCETIBILIDADE E PREDIÇÃO DA COMPACTAÇÃO DE SOLOS**  
**CULTIVADOS COM CANA-DE-AÇÚCAR EM PERNAMBUCO**

**Matheus Phelippe Santos Tolêdo**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Agrícola.

**Orientador:** Prof. Dr. Mário Monteiro Rolim

**RECIFE**  
**FEVEREIRO DE 2020**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal Rural de Pernambuco  
Sistema Integrado de Bibliotecas  
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

M427s Tolêdo, Matheus Phelippe Santos  
SUSCETIBILIDADE E PREDIÇÃO DA COMPACTAÇÃO DE SOLOS CULTIVADOS COM CANA-DE-AÇÚCAR  
EM PERNAMBUCO / Matheus Phelippe Santos Tolêdo. - 2020.  
48 f. : il.

Orientador: Mario Monteiro Rolim.  
Inclui referências.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Recife, 2020.

1. Compactação . 2. cana-de-açúcar. 3. tensão de pré-consolidação. 4. tráfego agrícola. 5. textura do solo. I. Rolim, Mario Monteiro, orient. II. Título

CDD 630

---

**SUSCETIBILIDADE E PREDIÇÃO DA COMPACTAÇÃO DE SOLOS  
CULTIVADOS COM CANA-DE-AÇÚCAR EM PERNAMBUCO**

Eng. Agr. Matheus Phelippe Santos Tolêdo

Dissertação defendida e aprovada em: 18/02/2020 pela banca examinadora:

ORIENTADOR:

---

Prof. Dr. Mário Monteiro Rolim  
(DEAGRI – UFRPE)

EXAMINADORES:

---

Prof. Dr. Igor Fernandes Gomes  
(CTG – UFPE)

---

Prof. Dr. João Luís Mendes Pedroso de Lima  
(DEC – FCTUC)

---

Dr. Renato Paiva de Lima  
(DEAGRI – UFRPE)

“Um dia, de uma ideia, uma semente verte, resvala fecundante e, se agregando ao solo, levanta-se... floresce... e ei-la a suster no colo, os frutos que não tinha – enquanto estava inerte!

Foi o germe da luz, a flor do pensamento, multiplicando a ação da força pequenina:

– De um retalho de bronze, ergueu uma oficina!

– De uma esteira de cal, gerou um monumento”

(Rogaciano Leite)

*Dedico,*

*aos meus pais, Edson Tolêdo Ignácio e Maria Serrate dos Santos.*

*Pelo amor, princípios, carinho, perseverança e afeto.*

*A José Laudemilson da Silva (in memoriam).*

*Por todo incentivo, admiração e compaixão.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder a graça de viver, me conduzir a uma grande vitória e ser meu refúgio, sobretudo, nos momentos mais difíceis da vida.

Aos meus Pais, Edson Tolêdo Ignácio e Maria Serrate dos Santos, por todo amor e carinho.

A toda minha família, meus avós, tios e primos por todo carinho, amor e afeto.

À minha segunda família, José Laudemilson (*in memoriam*), Maria Severina, Laudemilson Filho, Landsteiner Airlan e Lourdes Marrize, por todo zelo, apoio e carinho ao longo desse tempo.

À minha companheira, Maria Evika Lopes Bezerra, pelo nosso amor, sintonia e compaixão, sendo meu esteio emocional.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco e, em especial, ao Departamento de Engenharia Agrícola (DEAGRI) pela oportunidade de cursar o mestrado acadêmico.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa durante todo esse período e auxílio financeiro.

Ao Orientador, Prof. Dr. Mário Monteiro Rolim, pelo respeito, ensinamentos, comprometimento, profissionalismo e perseverança.

À Estação Experimental de Cana-de-açúcar do Carpina, à Agroindustrial São José S/A e a Usina Trapiche S/A por nos ceder suas áreas de cultivo para conduzirmos nossa pesquisa.

Aos integrantes do Laboratório de Mecânica dos Solos e Aproveitamento de Resíduos: Camila Gomes, Davi Thorpe, Eduardo Santos, Laura Couto, Pedro Francisco, Raguiara Primo, Renato Paiva, Roberta Cavalcanti e Talita Gouveia. Sou inteiramente grato pelas idas a campo e auxílio nas análises laboratoriais.

Aos amigos de turma, particularmente, Carlos André, Diego Castro, Gabriel Vasco, Hygor Kristoph, Ivis Andrei, Kenny Montalvo, Marcos Vinicius, Salimo Henriques e Uriel Calisto. Por todos os momentos de descontração, estudo, afeto e amizade firmada.

A todos, meus sinceros agradecimentos e um caloroso abraço!

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	i
LISTA DE TABELAS .....	ii
RESUMO.....	iii
ABSTRACT.....	iv
1. INTRODUÇÃO .....	13
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	15
2.1. Cana-de-açúcar e o sistema de colheita .....	15
2.2. Solos cultivados com cana-de-açúcar em Pernambuco.....	16
2.3. Compactação dos solos agrícolas .....	17
2.4. Compressibilidade e modelos de predição.....	20
2.5. Carbono orgânico, textura e comportamento compressivo do solo.....	23
3. HIPÓTESES .....	26
4. OBJETIVOS .....	26
4.1. Geral.....	26
4.2. Específicos .....	26
5. MATERIAL E MÉTODOS.....	26
5.1. Localização e caracterização dos ambientes experimentais.....	26
5.2. Protocolo amostral.....	28
5.3. Amostras deformadas .....	28
5.4. Amostras indeformadas .....	29
5.5. Resistência mecânica à penetração .....	30
5.6. Análise estatística.....	30
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	30
7. CONCLUSÃO .....	39
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	40



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Mapa de Reconhecimento de Solos do Estado de Pernambuco, enfatizando-se a Zona da Mata. ....	16
<b>Figura 2.</b> Esquema ilustrativo para a determinação da tensão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ) e o índice de compressão pelo método de Casa Grande. ....	21
<b>Figura 3.</b> Localização e distribuição espacial das unidades experimentais na Zona da Mata de Pernambuco. ....	27
<b>Figura 4.</b> Análise dos componentes principais, apresentando a relação dos múltiplos fatores, nos distintos solos e camadas (0,00-0,20 e 0,20-0,40 m) avaliadas nos cultivos de cana-de-açúcar antes e após colheita. ....	31
<b>Figura 5.</b> Análise dos componentes principais demonstrando a relação entre os múltiplos fatores, nos distintos solos analisados, separados de acordo com o teor de Silte + Argila independente da camada avaliada. ....	34
<b>Figura 6.</b> Comparação dos valores de $\sigma_p$ e IC geral (A, B), respectivamente, estimados nos modelos ajustados versus os medidos experimentalmente com base numa linha 1:1 .....	36
<b>Figura 7.</b> Comparação dos valores de $\sigma_{p29}$ , $\sigma_{p74}$ , IC <sub>29</sub> e IC <sub>74</sub> (A, B, C, D), respectivamente, estimados nos modelos ajustados versus os medidos experimentalmente com base numa linha 1:1. ....	37

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Modelos lineares e não lineares ajustados para predição da $\sigma_p$ e compressibilidade em distintas condições de solo e manejo.....	23
<b>Tabela 2.</b> Identificação das classes de solos, simbologia, manejo e localização das áreas experimentais dos distintos solos cultivados com cana-de-açúcar.....	27
<b>Tabela 3.</b> Caracterização física e carbono orgânico dos distintos solos cultivados com cana-de-açúcar avaliados nas profundidades de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m.....	29
<b>Tabela 4.</b> Parâmetros físico-mecânicos dos distintos solos avaliados nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m.....	32
<b>Tabela 5.</b> Modelos lineares para estimativa da $\sigma_p$ e IC geral e de acordo com a soma dos teores de silte + argila dos solos cultivados com cana-de-açúcar avaliados.....	36

# SUSCETIBILIDADE E PREDIÇÃO DA COMPACTAÇÃO DE SOLOS CULTIVADOS COM CANA-DE-AÇÚCAR EM PERNAMBUCO

## RESUMO

A intensificação do tráfego agrícola desde o plantio até as diversas colheitas no cultivo da cana-de-açúcar promove modificações em diferentes escalas na qualidade física dos solos em função das tensões excessivas aplicadas na superfície do solo, comprometendo o rendimento agrícola e longevidade das lavouras. Ensaio uniaxiais endométricos confinados possibilitam avaliar e monitorar a degradação físico-mecânica dos solos promovida pelo tráfego agrícola intenso. O objetivo desse estudo foi avaliar a suscetibilidade a compactação de solos com distintas classes texturais e manejo cultivados com cana-de-açúcar em Pernambuco e propor modelos matemáticos para a predição da compactação. Amostras deformadas e indeformadas do solo foram coletadas em nove locais nas profundidades de 0,00-0,20 m e 0,20-0,40 m, sob dois manejos (cana planta e cana soca). Os solos foram classificados como: Argissolo Amarelo, Espodossolo Ferrihumilúvico, Gleissolo Háptico e Latossolo Amarelo. Carbono orgânico (CO), porosidade total (PT), umidade na capacidade de campo (W), teor de silte + argila (S+A), grau de saturação (GS), grau de compactação (GC), índice de re-compressão (IR), índice de compressão (IC) e tensão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ) foram submetidos à análise de componentes principais, em uma abordagem multivariada. Adicionalmente, foram submetidos a análise de regressão linear múltipla considerando  $\sigma_p$  e IC como variáveis dependentes. A significância das variáveis explicativas sobre as variáveis dependentes foi considerada por meio do teste-F ( $p$ -value <0,05). O tráfego sucessivo não interferiu no comportamento das variáveis, mas os teores de S+A influenciaram. Solos com altos teores de finos apresentaram maior capacidade de carga, porém, foram mais susceptíveis ao processo de compactação, sobretudo, com elevação do GS. Os modelos de predição da capacidade de suporte de carga e suscetibilidade do solo a compactação geral e agrupados em função dos teores de S+A apresentaram coeficientes de determinação aceitáveis ( $\geq 60\%$ ). De forma geral,  $\sigma_p$  e o IC podem ser estimados por modelos de regressões lineares utilizando atributos do solo de fácil mensuração para uma ampla faixa de textura, CO e manejo.

**Palavras-chave:** Compactação, cana-de-açúcar, tensão de pré-consolidação, tráfego agrícola, textura do solo.

# SUSCEPTIBILITY AND PREDICTION OF COMPACTION OF SOIL CULTIVATED WITH SUGARCANE IN PERNAMBUCO

## ABSTRACT

The intensification of agricultural traffic from planting to several harvests in the cultivation of sugarcane promotes different changes in the physical quality of the soils due to the excessive stresses applied to the soil surface, compromising the agricultural yield and the longevity of the crops. Confined endometrial uniaxial tests make it possible to evaluate and monitor the mechanical-mechanical degradation of soils promoted by intense agricultural traffic. The objective of this study was to evaluate the susceptibility to soil compaction with different textural and management classes cultivated with sugarcane in Pernambuco and to propose mathematical models for the prediction of compaction. Deformed and undisturbed soil samples were collected in nine locations at the depths of 0.00-0.20 m and 0.20-0.40 m under two managements (cane plant and cane soca). The soils were classified as: Yellow Udisol, Spodosol, Entisol and Yellow Latosol. Organic carbon (OC), total porosity (TP), moisture in field capacity (W), silt + clay content (S+A), degree of saturation (DS), degree of compaction (DC), recompression index (RI), compression index (CI) and pre-consolidation stress ( $\sigma_p$ ) were submitted to principal component analysis, in a multivariate approach. Additionally, they were submitted to multiple linear regression analysis considering  $\sigma_p$  and CI as dependent variables. The significance of the explanatory variables on the dependent variables was considered using the F-test ( $p$ -value  $< 0.05$ ). The successive traffic did not interfere in the behavior of the variables, but the S+A levels influenced it. Soils with high levels of fines showed greater load capacity, however, they were more susceptible to the compaction process, especially with high DS. The prediction models of the load capacity and susceptibility of the soil to general compaction and grouped according to the levels of S + A showed acceptable coefficients of determination ( $\geq 60\%$ ). In general,  $\sigma_p$  and CI can be estimated by linear regression models using easily measured soil attributes for a wide range of texture, CO and management.

**Keywords:** Compaction, sugarcane, pre-consolidation stress, agricultural traffic, soil texture.

## 1. INTRODUÇÃO

O Estado de Pernambuco é um dos principais produtores de cana-de-açúcar da região nordeste, com previsão na safra 2019/2020 colher 12,869 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, com área plantada de 237,3 mil hectares, representando 28% e 25,8% da área plantada e produção no Nordeste, respectivamente, e rendimento agrícola médio de 54,86 t ha<sup>-1</sup> (CONAB, 2019).

As condições edafoclimáticas de Pernambuco possibilitam o cultivo de cana-de-açúcar na zona úmida e litorânea (Zona da Mata), com destaque para os Tabuleiros Costeiros (Mata Norte) e as Superfícies Retrabalhadas (Mata Sul), ocupando expressivas áreas de cultivo e, conseqüentemente, produção de açúcar, etanol e energia, gerando emprego e renda, possibilitando desenvolvimento socioeconômico nas regiões produtoras de cana-de-açúcar.

Por outro lado, a mecanização agrícola é presente em diversas lavouras em função da modernização da agricultura. Nos canaviais, especialmente, se prevaleceu por consequência do alto custo da mão de obra, além de pressões sociais e ambientais. O tráfego agrícola se torna, a cada safra, mais intenso desde o plantio até à colheita, transmitindo tensões excessivas no solo, resultando na modificação da estrutura do solo em diferentes escalas, comprometendo ao longo dos anos o desenvolvimento das raízes e o crescimento das plantas.

A tensão exercida devido ao tráfego agrícola intenso, promove deformações aos solos, cujo grau relaciona-se com a sua compressibilidade. Atributos físico-mecânicos do solo são fortemente afetados pela compactação como: densidade aparente, resistência mecânica à penetração, grau de compactação e volume de vazios, promovendo efeitos no crescimento do sistema radicular, riscos de déficit hídrico e erosão.

Assim sendo, o entendimento da compactação de solos agrícolas requer atributos ligados à mecânica dos solos, principalmente sobre as propriedades compressivas. Se faz necessário avaliar parâmetros mecânicos como: a tensão de pré-consolidação, que expressa a tensão máxima que o solo já foi submetido, sem compactação adicional irreversível, e o índice de compressão, que indica a susceptibilidade do solo ao processo de compactação. Os atributos mecânicos são afetados por fatores como: umidade do solo, textura, densidade do solo, carbono orgânico e estrutura.

A partir das propriedades de fácil mensuração do solo é possível prever a compressibilidade, assim como o estado físico-mecânico do solo, com o intuito de otimizar o planejamento de tráfego agrícola sem prejuízos aos cultivos. Modelos lineares e não lineares são largamente utilizados para prever a compressibilidade, entretanto, são

empregados apenas para uma restrita gama de solos e manejo, bem como, poucas variáveis explicativas inseridas nos modelos, normalmente utilizando a umidade, densidade do solo e resistência mecânica à penetração.

O discernimento dos atributos físico-mecânicos e suas interrelações nos distintos tipos de solo será de fundamental importância, buscando investigar o comportamento compressivo e determinar a tensão máxima que o solo pode sofrer sem causar compactação adicional, bem como, sua suscetibilidade ao processo de compactação. Com o uso de variáveis de fácil mensuração, propor funções de pedotransferência para prever a compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar, podendo contribuir no planejamento da mecanização agrícola com baixo risco de degradação.

Dessa forma, o objetivo desse estudo foi avaliar a suscetibilidade a compactação de solos com distintas classes texturais e manejo cultivados com cana-de-açúcar em Pernambuco e propor modelos de regressões lineares para a predição da compactação.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1. Cana-de-açúcar e o sistema de colheita**

O setor sucroenergético brasileiro, no último decênio, apresentou expressiva produções de etanol e exportação de açúcar, além de tornar-se uma significativa fonte na matriz energética nacional, bem como produção de açúcar e bioenergia, contribuindo como alternativa para a mitigação de gases do efeito estufa em detrimento ao uso de combustíveis de origem fóssil, constituindo um dos biocombustíveis mais produzidos em escala global (FURTADO et al., 2011; SALLES FILHO et al., 2017; BORDONAL et al., 2018; STEBAN et al., 2019).

A estimativa de produção brasileira de cana-de-açúcar na safra 2019/20 será 642,7 milhões de toneladas, numa área de 8,41 milhões de hectares, devendo alcançar 30,1 milhões de toneladas de açúcar e 35,5 bilhões de litros de etanol (CONAB, 2019). A região nordeste do Brasil deve colher 50,03 milhões de toneladas, numa área de 850,5 mil hectares, sendo Pernambuco o segundo maior produtor do norte/nordeste, representando 28% da produção (CONAB, 2019).

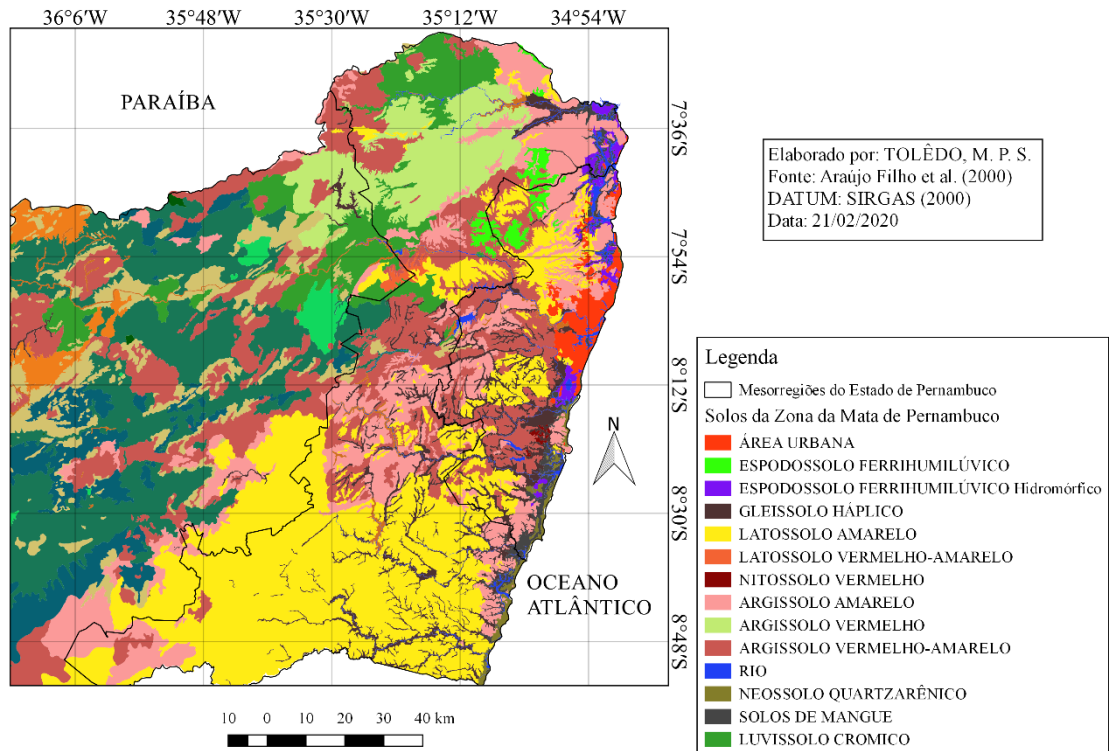
Em função da aptidão agrícola e condições edafoclimáticas, a Zona da Mata de Pernambuco concentra grande parte dos canaviais, principalmente, nos Tabuleiros Costeiros (Mata Norte) e nas Superfícies Retrabalhadas (Mata Sul), onde, a safra agrícola dura em média seis meses, em função do grande volume de matéria-prima a ser moída, sendo dessa forma, grande alicerce na geração de empregos nas regiões de produção, assegurando expressiva contribuição socioeconômica (SIMÕES NETO et al., 2012; SOUZA, 2015; ALBUQUERQUE et al., 2016).

A mecanização agrícola é unanimidade nas lavouras de cana-de-açúcar em grande parte do Brasil, com intenso tráfego de máquinas do plantio à colheita (BARBOSA et al., 2018). Na região nordeste do Brasil, em função das condições topográficas, o sistema de colheita, em sua maioria empregado nas lavouras é o semi-mecanizado, sendo constituído de queima, corte manual e, carregamento e transporte mecânico da cana-de-açúcar (SANTOS; BORÉM, 2013).

Por outro lado, a colheita mecanizada da cana-de-açúcar (cana crua) em escala nacional se intensificou desde 2007, de maneira que, aproximadamente 90% das lavouras comerciais são colhidas mecanicamente (LISBOA et al., 2019). A mudança da colheita manual (cana queimada) para o sistema de colheita mecanizada (cana crua) promoveu efeitos nos atributos físicos do solo através do tráfego agrícola intenso nos canaviais, aumentando os riscos de compactação do solo e gerando maiores discussões sobre o futuro do setor sucroenergético (VASCONCELOS et al., 2014; CASTIONI et al., 2018).

## 2.2. Solos cultivados com cana-de-açúcar em Pernambuco

As classes de solos presentes na Zona da Mata de Pernambuco são: Argissolos, Espodossolos, Gleissolos, Latossolos, Luvisolos, Neossolos e Nitossolos (Figura 1).



**Figura 1.** Mapa de Reconhecimento de Solos do Estado de Pernambuco, enfatizando-se a Zona da Mata.

**Fonte:** Araújo Filho et al. (2000)

Os solos cultivados com cana-de-açúcar em Pernambuco na Zona da Mata são inseridos em duas unidades geomorfológicas, sendo a superfície retrabalhada “mar de morros” (Mata Sul) e Tabuleiros Costeiros (Mata Norte) (SOUZA, 2015). As lavouras de cana-de-açúcar estão em diversos ambientes, sem serem consideradas as potencialidades e limitações dos solos, bem como, as características ambientais (ACCIOLY et al., 2012).

Os solos encontrados na região da Zona da Mata, em termos numéricos são: os Argissolos Amarelos correspondem à 13,42%, Latossolos Amarelos à 8,51%, Gleissolos à 1,25% e os Espodossolos à 0,37% de abrangência do território de Pernambuco, levando em consideração toda heterogeneidade e ocupação do uso do solo no Estado (ARAÚJO FILHO, 2000).

Nos topos dos relevos (chãs), os Latossolos Amarelos são profundos e/ou muito profundos e bem drenados, com predominância de textura argilosa e muito argilosa (300-600 g kg<sup>-1</sup> de argila) raramente média (ARAÚJO FILHO et al., 2000; CPRM, 2005).



Os Argissolos Amarelos, nas vertentes íngremes (encostas), são mediamente profundos e drenados com textura variando desde arenosa/média, até média/muito argilosa, porém, a melhor representação é a textura arenosa a média/média a argilosa, com teores de areia fina maiores que os de areia grossa (ARAÚJO FILHO et al., 2000; CPRM, 2005).

Nas várzeas, os Gleissolos são orgânicos e mal drenados ou artificialmente drenados, com textura muito variada, tendo-se observado casos com dominância de finos (silte de 100 - 520 g kg<sup>-1</sup> e argila de 370 - 780 g kg<sup>-1</sup>) e pequeno conteúdo da fração areia (10 a 110 g kg<sup>-1</sup>) prevalecendo a textura média e muito argilosa (ARAÚJO FILHO et al., 2000; CPRM, 2005).

Os Espodossolos, dominante em Tabuleiros Costeiros, são solos de baixo potencial agrícola, devido apresentar textura mais frequente de areia ou areia franca, podendo às vezes ocorrer com textura franco-arenosa, além da baixa capacidade de retenção de água e nutrientes para as plantas (ARAÚJO FILHO et al., 2000; CARVALHO et al., 2013).

Os Tabuleiros Costeiros são compostos por solos de textura argilosa, argilo-arenosa ou arenosa, expressando frágil arranjo estrutural e passíveis de formar blocos (CORRÊA et al., 2015; MARCELO et al., 2016). Nos Tabuleiros, há predominância de Latossolos Amarelos e Argissolos Amarelos, apesar de serem encontrados, em menores proporções, solos de má drenagem como: Espodossolos, Argissolos Acinzentados, Gleissolos e Plintossolos, além de Neossolos Quartzarênicos (CORRÊA et al., 2008; CURI et al., 2017).

Canaviais inseridos nos Tabuleiros podem apresentar solos com horizontes endurecidos em subsuperfície, promovendo redução da profundidade efetiva do solo e do sistema radicular, sendo esses denotados de “coesos” (CORRÊA et al., 2008; TAVARES et al., 2012, CARVALHO et al., 2013).

### **2.3. Compactação dos solos agrícolas**

Modificações nas características físico-mecânicas dos solos agrícolas afetam os ecossistemas, envolvendo a produção de alimentos, fibra, criação animal, biocombustíveis, processo erosivo, qualidade do ar e água, ciclo de nutrientes e no sequestro e dinâmica do carbono (BLANCO-CANQUI; RUIS, 2018).

Diante disso, nas últimas décadas, há grande preocupação no tocante aos problemas relacionados à compactação dos solos, tendo em vista que esse problema é

uma das principais causas da degradação de solos agrícolas no mundo (VASCONCELOS et al., 2012; OBOUR et al., 2017).

Atualmente, 33% dos solos sofrem algum tipo de degradação, sendo a compactação, um dos principais causadores, compondo o mais importante gerador de deterioração física, estimada em 68 milhões de hectares em solos agricultáveis via tráfego de veículos no campo (HAMZA; ANDERSON, 2005; FAO, 2015).

O processo de compactação se dá pelo aumento da densidade aparente frente a redução do volume de poros do solo, podendo ocorrer naturalmente ou pela transmissão das tensões excessivas na superfície do solo via tráfego agrícola (MOSSADEGHI-BJÖRKLUND et al., 2019). A compactação de solos agrícolas se dá principalmente por máquinas e implementos, os quais, utilizados na atualidade, possuem potencialidade de compactar os solos em até 1,20 m de profundidade (LIMA et al., 2017; SIVARAJAN et al., 2018). As tensões aplicadas nos solos pelo uso da agricultura intensiva, vem decrescendo significativamente os rendimentos das culturas agrícolas, pois, há redução da qualidade física desses solos (HAMZA; ANDERSON, 2005).

Associada ao tráfego intenso, condições inadequadas de umidade do solo no ato da colheita podem causar efeitos na qualidade física (TAVARES et al., 2012). O acompanhamento das mudanças na qualidade do solo é indispensável, visando obter meios de suavizar os danos desses problemas na produtividade dos cultivos agrícolas (CASTIONI et al., 2018).

A associação das operações mecanizadas com maior intensidade e a evolução das máquinas ao longo do tempo, onde a carga exercida foi acrescida em aproximadamente três vezes, gera dessa maneira, problemas de compactação nos solos agrícolas em subsuperfície (OLIVEIRA FILHO et al., 2015; SOUZA, 2015; OLIVEIRA FILHO et al., 2016).

Por sua vez, a projeção é no direcionamento e fabricação de máquinas e implementos agrícolas mais robustas e eficientes que os da atualidade, buscando a efetividade e redução de custos operacionais, enfatizando mais ainda a compactação, pois, haverá o crescimento expressivo das tensões que a mecanização agrícola transferirá aos solos cultivados (BENNETT et al., 2019; COLUMBI; KELLER, 2019).

O tráfego agrícola intenso gera aumento na densidade do solo, bem como limita o transporte de ar, água, penetração das raízes, ciclagem de nutrientes, reduzindo a produção agrícola e/ou florestal e a biota do solo (FAO, 2015; OBOUR et al., 2017; LIMA et al., 2019). Apesar da compactação ser considerada o maior causador de degradação ambiental na agricultura convencional, esse tipo de degradação física se

configura como a de maior dificuldade de identificação e racionalização, pois não se evidencia facilmente nos solos afetados (HAMZA; ANDERSON, 2005).

No Brasil, que possui extensas áreas cultivadas com cana-de-açúcar, houve transição significativa das lavouras do sistema tradicional de corte manual (cana queimada), para o corte mecanizado (cana crua), inserindo expressivamente sistemas mecanizados nos canaviais, sobretudo, na colheita, podendo causar danos às propriedades físicas e gerar compactação (MARASCA et al., 2015; SCARPARE et al., 2019). Nos canaviais com mecanização intensa, a degradação do solo é um dos pontos-chaves em relação ao uso das áreas agrícolas brasileiras (CASTIONI et al., 2018).

Lavouras colhidas de forma mecânica, associada a solos com altos teores de umidade, apresentam alto grau de compactação, resultando na diminuição da porosidade total e aumento da densidade aparente (MARASCA et al., 2015). Fatores como textura e umidade do solo influenciam na suscetibilidade à compactação, assim como, o atrito e ligação das partículas quando submetidos a tensões (MACEDO et al., 2010b).

Os canaviais são facilmente prejudicados pela compactação, pois, se trata de um cultivo semiperene, com ciclo médio de cinco a sete anos, possuindo 85% dos rizomas e raízes fasciculadas que se encontram até 0,50 m do solo, como também, se houver redução da macroporosidade em cerca dos 50%, induzindo a renovação das lavouras pelo decréscimo do rendimento agroindustrial causado especialmente pelas máquinas na colheita (LIMA et al., 2015b; OLIVEIRA FILHO et al., 2015; SCARPARE et al., 2019).

A macroporosidade é uma propriedade valiosa no sistema radicular das lavouras, trocas gasosas, oferta nutricional e caráter hidráulico do solo, quando comprometida, pode afetar a infiltração e disponibilidade hídrica (SCARPARE et al., 2019).

A compactação pode ser determinada por diversos atributos físicos do solo, bem como, por meio de propriedades compressivas (CAVALCANTI et al., 2019). O grau de compactação e densidade máxima obtidos no ensaio de Proctor, assim como, a resistência mecânica à penetração, empregada a longos anos em inúmeras aplicações agronômicas, são utilizados como indicações indiretas da compactação e usados em diversas condições de solo e manejo (ASSIS et al., 2009; ROBOREDO et al., 2010).

Dessa forma, a expansão dos canaviais deve ser monitorada, afim de serem utilizadas estratégias de manejo para reduzir a compactação, pois, influencia em grande parte no desenvolvimento das lavouras, além de serem ignoradas as baixas produtividades resultantes desse processo degradativo, se tornando importante sua compreensão e magnitude, visando proporcionar sustentabilidade no setor sucroenergético no Brasil (OLIVEIRA FILHO et al., 2015; CHERUBIN, 2016).

## 2.4. Compressibilidade e modelos de predição

A compressibilidade é um processo mecânico, ao qual se caracteriza pela variação do volume gradual do solo em função de tensões aplicadas sobre a superfície do solo, ocasionando redução do espaço poroso, neste caso específico, exercida pela tráfego agrícola nas lavouras, ocasionando deformações, cujo grau correlaciona-se com a sua capacidade compressiva, bem como, o teor de água ou potencial hídrico, carbono orgânico, estrutura do solo e o manejo do cultivo (SILVA; CABEDA, 2006; MACEDO et al., 2010a; KELLER et al., 2011).

Métodos mecânicos são indicados para a investigação dos efeitos da compactação, sendo os ensaios de adensamento, usualmente utilizados para o estudo do processo, podendo ser empregado para possíveis tomadas de decisão em cultivos agrícolas com uso intenso de tráfego de máquinas (PÖHLITZ et al., 2018). A predição da compactação nos solos agrícolas demanda atributos ligados à mecânica dos solos, principalmente, no que se diz respeito as propriedades compressivas (LIMA et al., 2019).

Por meio de ensaios de compressão uniaxial, tem-se conhecimento da redução do volume de poros causado pelo uso constante de máquinas e implementos agrícolas, associando-se parâmetros físico-mecânicos frente as tensões aplicadas sobre o corpo de prova (MACEDO et al., 2010b). Esses ensaios são amplamente utilizados por pesquisadores, pois são elementares, triviais e de maior acessibilidade frente a testes triaxiais (LIMA et al., 2019).

O ensaio de adensamento unidimensional é importante, porque a partir dele, sabe-se o quão susceptível é o solo a compactação, pois, a compressão é uma propriedade mecânica que confronta o estresse causado em detrimento a um parâmetro volumétrico do solo (KONDO; DIAS JÚNIOR, 1999; GREGORY et al., 2006). O estresse causado no solo pelo tráfego agrícola intenso é de fundamental relevância, haja vista que esse problema pode causar modificação nas funções do solo aos cultivos agrícolas (KELLER et al., 2014).

A curva de compressão (Figura 2) é expressa no plano semi-logarítmico, relacionando-se o logaritmo da tensão aplicada no eixo das abscissas e a redução do índice de vazios, no eixo das ordenadas. É composta pela curva secundária de re-compressão e a reta virgem de compressão. A secundária, expressa as tensões que o solo já sofreu, as quais são: mínimas, elásticas e reversíveis; entretanto, a reta virgem representa as deformações plásticas, não reversíveis (VASCONCELOS et al., 2012). O tráfego agrícola, preferencialmente, deve ser realizado na região da curva de compressão



A capacidade de suporte de cargas é regida pelo teor de água no solo, onde, com baixos conteúdos, há acréscimo da capacidade de suporte, tornando os solos mais resistentes ao processo de deformação, porém, com elevados teores de umidade, haverá compactação adicional (MACEDO et al., 2010b; OLIVEIRA et al., 2011; VASCONCELOS et al., 2012).

A avaliação do comportamento compressivo é importante, pois, com base no ponto de vista físico-mecânico, a compressibilidade é utilizada para prever os efeitos da compactação, buscando reduzir os danos desse problema aos solos agrícolas (PIRES et al., 2012).

A partir das propriedades físicas de fácil mensuração é possível estimar a tensão de pré-consolidação, assim como o estado físico-mecânico do solo, propondo-se imprimir o manejo e planejamento de atividades mecanizáveis sem prejuízos aos cultivos em que a capacidade de suporte do solo é um atributo mecânico afetado pela gênese, fatores antrópicos, além de propriedades intrínsecas do solo como: estrutura, textura, potencial matricial (sucção) e densidade ((LIMA et al., 2006; AJAYI et al., 2009a).

Modelos lineares e não lineares são largamente utilizados na predição da tensão de pré-consolidação e compressibilidade de solos agrícolas (Tabela 1). Modelos como os de: Dias Júnior, (1994), Imhoff et al. (2004), Saffih-Hdadi et al. (2009), Severiano et al. (2010), Iori et al. (2012), Lima et al. (2015), Imhoff et al. (2016), Reichert et al. (2018), Mendes et al. (2019), entre outros, são amplamente práticos para a estimativa da predição da compactação. Entretanto, são empregados apenas para uma restrita gama de solos e manejo, bem como, possuem poucas variáveis explicativas inseridas nos modelos, comumente utilizando a umidade, densidade do solo e resistência mecânica à penetração.

A  $\sigma_p$  e IC detém ligações com diversos outros atributos físico-mecânicos do solo, fazendo com que novos modelos possam ser indicados para um manejo racional do solo com alto tráfego de máquinas agrícolas.

**Tabela 1.** Modelos lineares e não lineares ajustados para predição da  $\sigma_p$  e compressibilidade em distintas condições de solo e manejo.

Modelos Lineares e Não Lineares	Descrição	Autor
$\sigma_p = 10^{(a+b\theta)}$	Modelo não linear para solos tropicais	Dias Júnior, (1994)
$I_c = 0,248 + 0,006TA - 0,121DS$ ; $R^2 = 0,77$ $\sigma_p = -566,8 + 442,9DS + 4,3TA - 733,1\theta$ ; $R^2 = 0,77$	Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar com ampla variabilidade textural	Imhoff et al. (2004)
$\sigma_p = 7,71 + 112,21DS - 2,82\theta$ (MF) ; $R^2 = 0,88$ $\sigma_p = -220,68 + 191,45 DS + 2,77\theta$ (G) $R^2 = 0,57$ $\sigma_p = 4,19 + 202,54DS - 10,92\theta$ (F) ; $R^2 = 0,95$ $I_c = 2,37 - 1,18DS - 0,017\theta$ (MF) ; $R^2 = 0,77$ $I_c = 1,36 - 0,77DS - 0,005\theta$ (A) ; $R^2 = 0,87$ $I_c = 1,85 - 0,91DS - 0,012\theta$ (F) ; $R^2 = 0,98$	Solos com diferentes texturas	Saffih-Hdadi et al. (2009)
$\sigma_p = 2,6\theta^{-1,24} DS^{4,93}$ ; $R^2 = 0,83$ (LV) $\sigma_p = 20,77\theta^{-0,91} DS^{3,34}$ ; $R^2 = 0,72$ (C)	Modelo adaptado de Busscher (1990), colheita mecanizada em cana-de-açúcar	Severiano et al. (2010)
$\sigma_p = 10^{(2,9387-1,4868\theta)}$ ; $R^2 = 0,81$	Argissolo e Cambissolo	Iori et al. (2012)
$\sigma_p = -95,21 - 0,77U + 19,73DS + 1,00RP - 0,20MO + 0,80TA + 4,32LL + 4,34LP$ (M1); $R^2 = 0,83$ $\sigma_p = -89,74 - 0,64U + 16,32DS + 1,40RP - 0,30MO + 0,62TA + 4,46LL + 4,36LP$ (M2); $R^2=0,80$	Argissolo Amarelo, cultivado com cana-de-açúcar	Lima et al. (2015)
$\sigma_p = -402,819 + 64 \ln(MO) + 45,297\ln(TA) - 250,874 \ln(U)$ ; $R^2 = 0,77$ $IC = 0,431 + 0,119\ln(U) - 0,127\ln(DS) + 0,053\ln(S+A) - 0,076\ln(MO)$ ; $R^2 = 0,77$	Solos com ampla variedade de textura, matéria orgânica e densidade	Imhoff et al. (2016)
$I_c = 1,17956 - 0,5556DS + 0,01673MO + 0,00014TA - 0,71532\theta$ $R^2 = 0,86$	Solos com diferentes texturas, graus de compactação e carbono orgânico	Reichert et al. (2018)
$\sigma_p = 46,40 - 303,83U + 49,25DS$ ; $R^2 = 0,70$	Argissolo Amarelo sob cultivo de cana-de-açúcar (0,0 - 0,2m)	Mendes et al. (2019)

$\sigma_p$  = Tensão de pré-consolidação (kPa);  $I_c$  = Índice de compressão (-); TA = Teor de argila (%); S+A = Teor de silte + argila (%); U= Umidade gravimétrica ( $g\ g^{-1}$ );  $\theta$  = Umidade volumétrica ( $cm^3\ cm^{-3}$ ); DS: Densidade do solo ( $g\ cm^{-3}$ ); RP = Resistência Mecânica à Penetração (MPa); LL= Limite de Liquidez (%); LP = Limite de Plasticidade (%); MO = Matéria Orgânica (%;  $g\ kg^{-1}$ ); (MF) Muito fina; (G) Grossa; (F) Fina; (LV) Latossolo Vermelho; (C) Cambissolo; (M1) 0,10-0,13 m; (M2) 0,30-0,33 m.

## 2.5. Carbono orgânico, textura e comportamento compressivo do solo

O componente orgânico do solo é de fundamental importância nos ecossistemas terrestres, pois sua magnitude e estruturação governam importantes processos nos

sistemas, sendo o carbono orgânico, uma fração da matéria orgânica do solo que nutre a cadeia alimentar do solo, influenciando no ciclo de nutrientes e na biota da rizosfera (OLIVEIRA et al., 2017).

Por questões agronômicas, econômicas e ambientais, áreas de colheita de cana queimada decrescem nos últimos anos frente à colheita de cana crua, sendo essa, realizada por máquinas que colhem os colmos e lançam sobre a superfície do solo resíduos orgânicos, comumente conhecido como palhada ou palhiço (OLIVEIRA et al., 2017). Em sistemas mecanizados de colheita de cana crua, os estoques de carbono podem ser acrescidos em até 40% na camada arável e 35% em subsuperfície (SIGNOR et al., 2016).

A resistência do solo à compactação pode ser incrementada ou reduzida em solos com acúmulo de matéria orgânica, pois, proporciona maior intervalo de umidade trafegável e reduz a resistência mecânica à penetração das raízes em baixos teores de água no solo (BRAIDA et al., 2010).

Adicionar e incorporar resíduos orgânicos promove benefícios às características físico-químicas dos solos, sobretudo, em solos de Tabuleiros Costeiros, como os Latossolos e Argissolos (VASCONCELOS et al., 2012). O carbono orgânico interfere na resistência do solo, porém, os mecanismos de atuação são amplamente complexos (KELLER et al., 2011).

Ao avaliarem fertirrigação com vinhaça e acrescida de torta de filtro na cultura da cana-de-açúcar, Vasconcelos et al. (2012) apontaram maior compressibilidade e menores tensões de pré-consolidação em relação ao manejo apenas irrigado, porém, todos os tratamentos foram superiores ao solo sob mata nativa.

Altos teores de matéria orgânica conferem maior compressibilidade aos solos, sobretudo, em elevados teores de água, entretanto, esses são resilientes, recuperando-se facilmente ao processo de compactação, todavia, a amplitude dos teores de matéria orgânica e os efeitos aos solos são dependentes da textura, porosidade, umidade, coesão e densidade aparente (PEREIRA et al., 2007; BRAIDA et al., 2010; REICHERT et al., 2018).

A reposição constante de material orgânico pode mitigar os efeitos do processo de compactação e suas implicações aos sistemas agrícolas, seja na superfície do solo, dissipando as cargas transmitidas pelo tráfego de máquinas e/ou animais, ou em sua incorporação em subsuperfície, incrementando o limite de umidade sem causar compactação adicional (BRAIDA et al., 2008; BRAIDA et al., 2010).

O aporte de matéria orgânica nos canaviais, promove baixos valores de tensão de pré-consolidação em relação a lavouras que não adicionam matéria orgânica no solo, de



forma que, se assemelham até a valores de mata nativa quando há aplicação por sucessivos anos de cultivo (OLIVEIRA et al., 2011).

O incremento no teor de carbono orgânico no solo de 1%, reduz o grau de compactação em 11%, independentemente da textura; comprovando que o aporte de matéria orgânica promove melhoria nos atributos mecânicos dos solos (VASCONCELOS et al., 2014). O carbono orgânico é uma variável indireta da compactação do solo, altos valores conferem redução do fluxo de água e crescimento radicular, bem como, o crescimento e rendimento dos cultivos (REICHERT et al., 2009).

Além do carbono orgânico a textura influencia no processo compressivo dos solos, pois, com o acréscimo no teor de argila, há incremento na capacidade de suporte de carga do solo, porém, são mais susceptíveis à compactação em relação aos arenosos (IMHOFF et al., 2004; SUZUKI et al., 2008).

A suscetibilidade dos solos argilosos a compactação pode estar associada a quantidade maior de microporos em relação aos arenosos e na adesão dos finos e água, pois, quando submetidos a mesma tensão matricial, os argilosos apresentarem maior conteúdo de água contida nos poros em relação aos arenosos (SUZUKI et al., 2008; BRAGA et al., 2015).

Dessa maneira, Severiano et al. (2011) afirmaram que Latossolos com conteúdo de argila variando de 150-750 g kg<sup>-1</sup> são naturalmente susceptíveis a compactação, entretanto, torna-se ainda mais vulneráveis, com a intensidade do tráfego de máquinas agrícolas, sobretudo, com o aumento do teor de umidade do solo. Latossolos argilosos ou muito argilosos são mais susceptíveis a compactação em relação aos de textura média (SEVERIANO et al., 2011).

Os solos argilosos possuem maior capacidade de reter água e dessa forma, o conteúdo de água retido nos microporos forma uma película lubrificante sobre as partículas sólidas, facilitando movimento e o rearranjo dos grãos e poros do solo, tornando mais suscetível a compactação em relação aos arenosos (REICHERT et al., 2018).

A suscetibilidade a compactação é menor em solos com densidade aparente elevada, porém, em solos argilosos e com maior índice de vazios é superior, exceto em condições de altos conteúdos de água no solo (BRAGA et al., 2015).

A textura da solo influencia nas propriedades físico-mecânicas, pois, o incremento no teor de argila proporciona acréscimo na porosidade total, retenção de água e redução da densidade aparente, porém, a suscetibilidade aumenta, bem como, o risco de compactação adicional se torna mais previsível com o intenso tráfego de máquinas agrícolas (SEVERIANO et al., 2013).

### **3. HIPÓTESES**

- As características físico-mecânicas das distintas classes de solos exercem influência no comportamento compressivo dos solos;
- Sucessivas colheitas da cana-de-açúcar induzem o aumento da tensão de pré-consolidação;
- Solos com maiores teores de argila e carbono orgânico apresentam maiores valores de índice de compressão em relação aos demais.

### **4. OBJETIVOS**

#### **4.1. Geral**

Avaliar a suscetibilidade e prever a compactação de solos com distintas classes texturais e manejo cultivados com cana-de-açúcar na Zona da Mata de Pernambuco e propor modelos de regressões lineares para a predição da compactação.

#### **4.2. Específicos**

- a) Determinar a tensão de pré-consolidação e índice de compressão das diferentes classes dos solos cultivados com cana-de-açúcar;
- b) Avaliar o histórico de tensões de pré-consolidação dos solos e suas relações com as suas respectivas classes;
- c) Relacionar variáveis físicas do solo com a tensão de pré-consolidação e índice de compressão;
- d) Propor modelos de regressões para estimar a tensão de pré-consolidação e o índice de compressão dos solos avaliados.

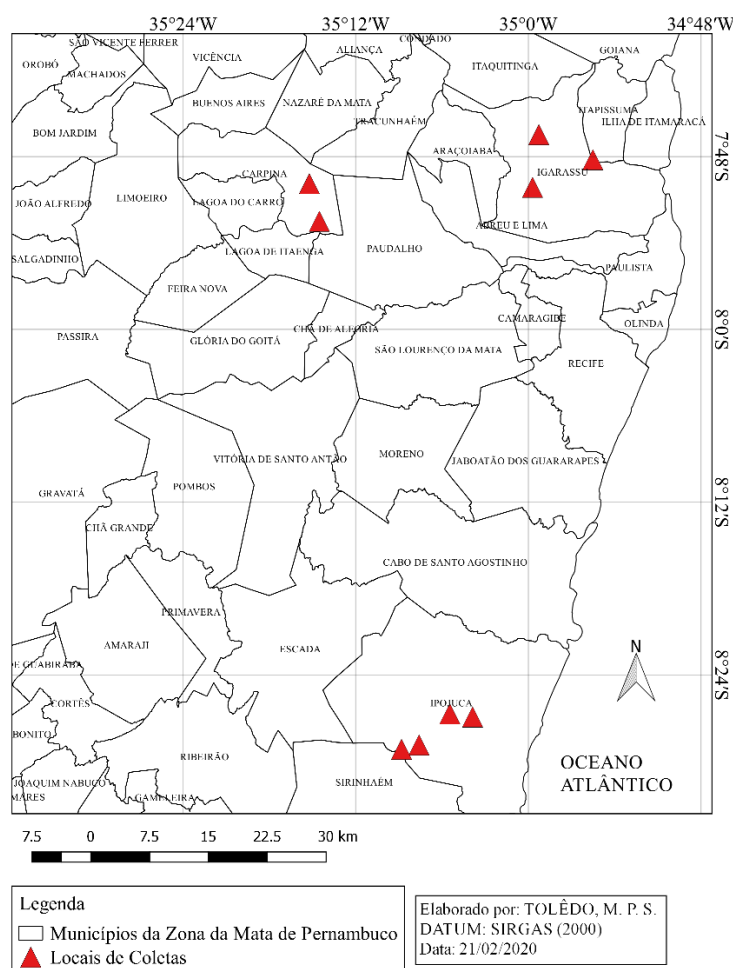
### **5. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **5.1. Localização e caracterização dos ambientes experimentais**

Para o experimento foram coletadas amostras de solo cultivados com cana-de-açúcar em diversos locais da zona da mata de Pernambuco, a saber: Estação Experimental de Cana-de-açúcar do Carpina (EECAC, Carpina), Agroindustrial São José S/A (Igarassu, Mata Norte) e Usina Trapiche S/A (Sirinhaém e Ipojuca, Mata Sul), Figura 3.

O critério de seleção dos locais foi conforme a variação textural e tempo de cultivo. Os solos escolhidos foram: Argissolo Amarelo, Espodossolo Ferri-humilúvico, Gleissolo Háptico e Latossolo Amarelo, cuja localização está descrita na Tabela 2.

Quanto ao tempo de cultivo: cana-planta, após a realização do preparo do solo com as operações de aração, gradagem e sulcagem em toda a área; enquanto na cana-soca, com corte da cana manual e colheita realizada de forma semi-mecanizada. Quanto aos ensaios foram realizados no Laboratório Mecânica dos Solos e Aproveitamento de Resíduos, UFRPE.



**Figura 3.** Localização e distribuição espacial das unidades experimentais na Zona da Mata de Pernambuco.

**Tabela 2.** Identificação das classes de solos, simbologia, manejo e localização das áreas experimentais dos distintos solos cultivados com cana-de-açúcar.

Classes de Solos	Símbolo	Tempo de cultivo	Coordenadas	Local
Argissolo Amarelo	(PA <sub>1</sub> )	Cana planta (01/03/2019)	7°51'20.4"S 35°14'18.0"O	Carpina
Argissolo Amarelo	(PA <sub>2</sub> )	Cana soca (6° corte)	7°51'8.52"S 35°14'10.0"O	Carpina
Espodossolo Ferri-humilúvico	(ESK)	Cana planta (21/06/2018)	7°46'54.3"S 34°57'0.0"O	Igarassu
Latossolo Amarelo	(LA <sub>1</sub> )	Cana planta (15/09/2018)	7°47'26.3"S 34°57'26.7"O	Igarassu

Argissolo Amarelo	(PA <sub>3</sub> )	Cana planta (11/01/2019)	7°48'50.9"S 34°59'19.7"O	Igarassu
Gleissolo Háptico	(GX <sub>1</sub> )	Plantio (01/10/2019)	8°26'41.4"S 35° 4'25.7"O	Ipojuca
Gleissolo Háptico	(GX <sub>2</sub> )	Cana soca (17° corte)	8°26'58.00"S 35° 4'17.3"O	Ipojuca
Latossolo Amarelo	(LA <sub>2</sub> )	Cana soca (7° corte)	8°28'50.4"S 35° 8'20.9"O	Ipojuca
Latossolo Amarelo	(LA <sub>3</sub> )	Cana planta (16/08/2019)	8°29'9.6"S 35° 8'48.5"O	Sirinhaém

## 5.2. Protocolo amostral

As coletas das amostras deformadas e indeformadas foram obtidas de forma aleatórias nas profundidades de 0,00-0,20 m e 0,20-0,40 m, com quatro repetições em cada profundidade de cada classe de solo, bem como, para cada variável a ser avaliada, totalizando 40 amostras para cada variável. A média dos valores das amostras para caracterização física e carbono orgânico dos solos para as duas camadas avaliadas estão descritas na Tabela 3.

## 5.3. Amostras deformadas

A textura foi determinada pelo método do densímetro de Bouyoucos (EMBRAPA, 2017). A fração areia foi separada por tamisação (0,053 mm), após secagem em estufa a 105°C por 24 h, sendo pesada e calculada como areia total. O silte foi obtido pela diferença entre as frações areia e argila.

O carbono orgânico (CO) foi obtido por titulação seguindo a metodologia de Yeomans e Bremner (1988). A densidade de partículas foi determinada utilizando um picnômetro de gás hélio modelo ACCUPYC 1330 (Micromeritics Instrument Corporation) com três repetições para cada tipo de solo e camada. A porosidade total (PT) do solo foi determinada pela relação entre a densidade do solo e a densidade de partículas (EMBRAPA, 2017).

O ensaio de compactação foi realizado conforme NBR 7182 (ABNT, 1986), que descreve o ensaio de Proctor Normal. Após o ensaio, a curva de compactação foi determinada para a obtenção da densidade seca máxima ( $D_{s\text{máx}}$ ) e umidade crítica ( $W_{\text{crit}}$ ). Esse procedimento foi realizado via função *Criticalmoisture*, disponível no R Package *Soilphysics* (R Core Team, 2016; SILVA; LIMA, 2016). O grau de compactação dos solos (GC) foi determinado pela relação entre a densidade aparente do solo e a densidade seca máxima de compactação, obtida no ensaio de Proctor Normal.

**Tabela 3.** Caracterização física e carbono orgânico dos distintos solos cultivados com cana-de-açúcar avaliados nas profundidades de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m.

Solos	Ds	D <sub>máx</sub>	Dp	CO			
					(g cm <sup>-3</sup> )		Argila
					(g kg <sup>-1</sup> )		
0,00-0,20 m							
PA <sub>1</sub>	1,48	1,80	2,68	23,18	743,13	119,38	137,50
PA <sub>2</sub>	1,47	1,91	2,67	16,76	793,13	94,38	112,50
ESK	1,52	1,75	2,67	11,92	877,50	91,25	31,25
LA <sub>1</sub>	1,58	1,70	2,66	20,93	593,75	137,50	268,75
PA <sub>3</sub>	1,62	1,86	2,67	18,42	668,13	88,13	243,75
GX <sub>1</sub>	1,06	1,15	2,55	26,52	230,00	520,00	250,00
GX <sub>2</sub>	1,27	1,33	2,58	21,75	221,88	415,63	362,50
LA <sub>2</sub>	1,32	1,43	2,64	21,02	387,50	300,00	312,50
LA <sub>3</sub>	1,14	1,52	2,63	20,38	451,88	248,13	300,00
0,20-0,40 m							
PA <sub>1</sub>	1,53	1,92	2,67	19,95	677,50	122,50	200,00
PA <sub>2</sub>	1,60	1,92	2,69	16,17	783,75	78,75	137,50
ESK	1,46	1,81	2,69	7,88	956,25	25,00	18,75
LA <sub>1</sub>	1,53	1,61	2,67	16,08	478,75	190,00	331,25
PA <sub>3</sub>	1,59	1,81	2,68	15,79	571,25	110,00	318,75
GX <sub>1</sub>	1,05	1,14	2,55	24,85	123,13	476,88	400,00
GX <sub>2</sub>	1,09	1,27	2,59	13,33	55,00	445,00	500,00
LA <sub>2</sub>	1,30	1,44	2,71	9,80	190,00	235,00	575,00
LA <sub>3</sub>	1,28	1,51	2,66	15,61	340,00	216,25	443,75

Ds = Densidade do solo; D<sub>máx</sub> = Densidade máxima; Dp = Densidade de partículas; CO = Carbono orgânico.

#### 5.4. Amostras indeformadas

As coletas para determinação da densidade foram realizadas por meio do amostrador de Umland com anel volumétrico de 0,05 m de altura e 0,05 m de diâmetro nas profundidades de 0,0-0,20 e 0,2-0,40 m, onde, após coleta, foram acondicionados em sacos e envoltas com papel filme, evitando-se perturbações do traslado até o laboratório, seguindo a metodologia Embrapa (2017).

A compressibilidade foi avaliada em amostras com estrutura preservada, coletadas em anéis metálicos rígidos de 0,025 m de altura e 0,065 m de diâmetro, nas profundidades de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m conforme NBR 12007 (ABNT, 1990). No laboratório, foram preparadas retirando-se o excesso de solo envolto no anel volumétrico e colocadas para saturar por 48 horas. Após decorrido o tempo, foram submetidas à tensão matricial de 10 kPa (mesa de tensão).

Após a retirada da mesa de tensão, as amostras foram pesadas e inseridas numa prensa de adensamento (Tipo Bishop com relação de 1:10, Solotest) para posteriores ensaios. Durante os ensaios foram aplicadas as cargas de 12,5; 25; 50; 100; 200; 400; 800 e 1600 kPa, estabelecidas pela norma NBR 12007 (ABNT, 1990) com duração de aplicação de carga de 120 segundos. Para a construção das curvas de compressibilidade e determinação da tensão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ), índice de compressão (IC) e recompressão (IR) foi utilizado o software R (R Core Team, 2016) empregando a função SigmaP, Package *Soilphysics* (SILVA; LIMA, 2016), optando-se pela curva de Pacheco Silva (ABNT, 1990).

### **5.5. Resistência mecânica à penetração**

A resistência a penetração (RP) foi realizada de forma aleatória nos talhões avaliados, com quatro repetições, fazendo uso do penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar Stolf reduzido com ângulo de cone de 30°. A profundidade investigada foi até 40 cm, com anotação do número de golpes registrados a cada 5 cm. A transformação da penetração da haste do aparelho no solo (cm/impacto) em resistência à penetração, em Mega Pascal (MPa), foi obtida segundo Stolf (1991).

### **5.6. Análise estatística**

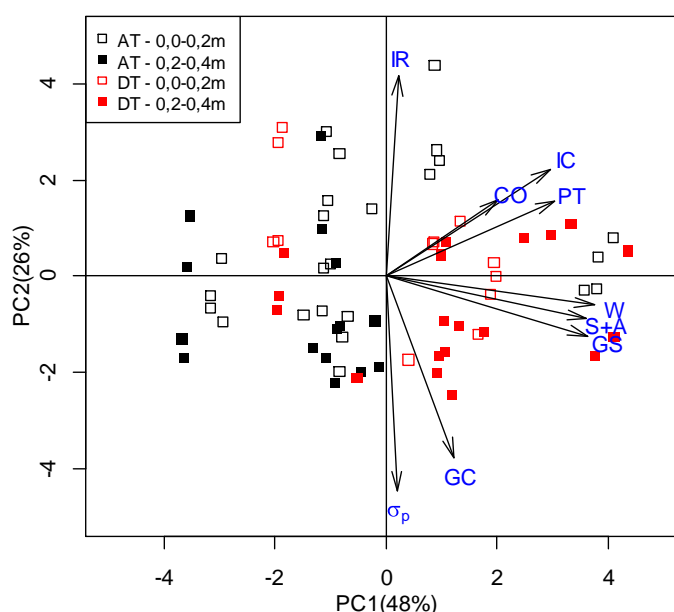
Os dados foram submetidos à análise de componentes principais, em uma abordagem multivariada, envolvendo todas as variáveis em estudo, visando agrupar e reduzir as variáveis originais. Dessa forma, objetivou-se minimizar a vasta gama de variáveis físico-mecânicas, reduzir um grande número de variáveis e agrupá-las em quadrantes nos seus respectivos componentes buscando explicar a alta variabilidade experimental. Adicionalmente, os dados foram submetidos a análise de regressão linear múltipla considerando  $\sigma_p$  e IC como variáveis dependentes. A significância das variáveis explicativas sobre as variáveis dependentes foi considerada através do teste-F ( $p$ -value <0,05) da ANOVA. Os dados para análise multivariada de componentes principais e análise de regressão foram realizados por meio do software R (R Core Team, 2017).

## **6. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A análise de componentes principais aplicada aos dados, avaliados isoladamente para os diferentes manejos antes e após o tráfego (tempo de cultivo) estão apresentados na Figura 4. A proporção explicativa das variáveis avaliadas nos componentes 1 e 2 foi de 74%.

Observa-se, Figura 4, que não houve distinção nítida entre solos submetidos a sucessivas colheitas em relação aos demais, nas camadas (0,00-0,20 e 0,20-0,40 m). Por se tratar de solos com variação nas frações granulométricas (Tabela 3), a colheita, por si só, não influenciou no processo, corroborando com Reichert et al. (2018) que afirma que o estresse compressivo causa efeito primeiramente ao solo com a umidade, seguida da densidade, matéria orgânica e teor de argila.

Com relação a tensão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ), Figura 4, o vetor não proporcionou efeito no conjunto dos dados avaliados. Apesar dos ensaios de compressão serem realizados em uma única tensão (10 kPa), o conjunto das demais variáveis avaliadas nos distintos solos não se manteve constante.



**Figura 4.** Análise dos componentes principais, apresentando a relação dos múltiplos fatores, nos distintos solos e camadas (0,00-0,20 e 0,20-0,40 m) avaliadas nos cultivos de cana-de-açúcar antes e após colheita.

AT: Antes do tráfego; DT = Após o tráfego;  $\sigma_p$  = Tensão de Pré-consolidação (kPa); IC=Índice de compressão (-); IR= Índice de Recompressão (-); S+A= Silte + Argila ( $\text{g kg}^{-1}$ ); W= Umidade sob tensão de 10 kPa (%); GC= Grau de Compactação (%); GS= Grau de Saturação (%); PT= Porosidade total ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ); CO= Carbono Orgânico ( $\text{g kg}^{-1}$ ).

Os resultados de  $\sigma_p$  variaram de 36,62 a 211,14 kPa (Tabela 4) bem próximos aos encontrados por Imhof et al. (2016) e Reichert et al. (2018). Observa-se que os solos PA<sub>2</sub>, GX<sub>2</sub> e LA<sub>2</sub> (submetidos a várias colheitas) apresentam altas tensões de pré-consolidação, elevada resistência mecânica a penetração e grau de compactação em relação aos PA<sub>1</sub>, GX<sub>1</sub> e LA<sub>3</sub> em ambas as camadas, respectivamente. Esses solos apresentam características físicas semelhantes, porém, o primeiro grupo (PA<sub>2</sub>, GX<sub>2</sub> e LA<sub>2</sub>), recebeu

sucessivas colheitas e o segundo (PA<sub>1</sub>, GX<sub>1</sub> e LA<sub>3</sub>) após o preparo. Os grupos mencionados se assemelham em textura, como também dos solos PA<sub>3</sub> e LA<sub>1</sub>, que possuem valores aproximados de  $\sigma_p$  em ambas as camadas.

Os resultados obtidos corroboram com Cavalcanti et al. (2019) que avaliaram sucessivas colheitas de cana-de-açúcar (plântio à renovação) em um Argissolo Amarelo distrocoeso, afirmando que consecutivas colheitas proporcionam incremento de matéria orgânica no solo, possibilitando melhoria na qualidade física, entretanto, pode crescer levemente o grau de compactação e a tensão de pré-consolidação em virtude da intensidade do tráfego agrícola.

Keller et al. (2011) e Rodríguez et al. (2012) ainda justificam que o processo de compactação não é apenas inerente às condições de solo, mas também, ao tipo e tamanho do rodado das máquinas, bem como, as características mecânicas dos solos são largamente afetadas pelo potencial hídrico, textura, estrutura e carbono orgânico. Pneus de baixa pressão de insuflagem reduzem as transmissões de tensões aplicadas na superfície do solo (CHAMEN et al., 2015).

Na Tabela 4, verifica-se a média dos parâmetros físico-mecânicos avaliados para os distintos tipos de solo nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m. As variáveis foram modificadas nas duas camadas e com as colheitas sucessivas (tráfego constante).

O GC variou de 75,18 a 95,46%, parâmetro eficaz para a identificação do processo de compactação (REICHERT et al., 2009), os valores obtidos se aproximam aos de Oliveira et al. (2010) e Tavares et al. (2012) avaliados em Argissolo Amarelo, além de, Vasconcelos et al. (2014) estudando Latossolo Amarelo; todos os autores, estudaram solos cultivados com cana-de-açúcar em distintos manejos e comparando com mata nativa. Quanto ao grau de compactação (GC) por ser um parâmetro que avalia a compactação, altos valores indicam compactação elevada do solo e, conseqüentemente, problemas com o desenvolvimento da cultura.

**Tabela 4.** Parâmetros físico-mecânicos dos distintos solos avaliados nas camadas de 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m.

Solos	GC	GS	RP	IC	$\sigma_p$	W <sub>100 cca</sub>	PT	Silte + Argila
	(%)		(MPa)	(-)	(kPa)	(%)		(g kg <sup>-1</sup> )
0,00-0,20 m								
PA <sub>1</sub>	82,49	33,84	1,38	0,26	36,62	15,09	44,60	256,88
PA <sub>2</sub>	77,01	29,08	1,77	0,19	50,44	13,06	44,91	206,88
ESK	86,69	16,05	1,20	0,11	115,52	6,93	43,18	122,50
LA <sub>1</sub>	92,80	46,37	2,98	0,21	107,87	18,87	40,69	406,25



PA <sub>3</sub>	86,92	44,21	1,80	0,21	114,12	17,44	39,45	331,88
GX <sub>1</sub>	91,74	85,82	1,98	0,24	92,04	50,31	58,63	770,00
GX <sub>2</sub>	95,46	70,25	3,87	0,37	136,34	35,68	50,79	778,13
LA <sub>2</sub>	92,54	57,16	7,59	0,26	100,69	28,51	49,88	612,50
LA <sub>3</sub>	75,18	38,85	2,45	0,44	42,52	21,97	56,55	548,13
0,20-0,40 m								
PA <sub>1</sub>	79,72	39,81	2,77	0,22	131,02	16,99	42,67	322,50
PA <sub>2</sub>	83,17	32,63	2,48	0,21	131,02	13,26	40,64	216,25
ESK	80,57	11,18	2,41	0,09	140,05	5,12	45,79	43,75
LA <sub>1</sub>	94,81	52,02	3,62	0,21	152,56	22,28	42,83	521,25
PA <sub>3</sub>	87,71	50,36	2,30	0,19	171,43	20,53	40,76	428,75
GX <sub>1</sub>	92,35	91,70	2,52	0,35	162,37	53,84	58,72	876,88
GX <sub>2</sub>	86,11	74,39	3,02	0,35	175,62	42,98	57,77	945,00
LA <sub>2</sub>	90,05	62,11	5,59	0,25	211,14	32,39	52,15	810,00
LA <sub>3</sub>	85,06	58,84	3,95	0,33	141,80	30,43	51,71	660,00

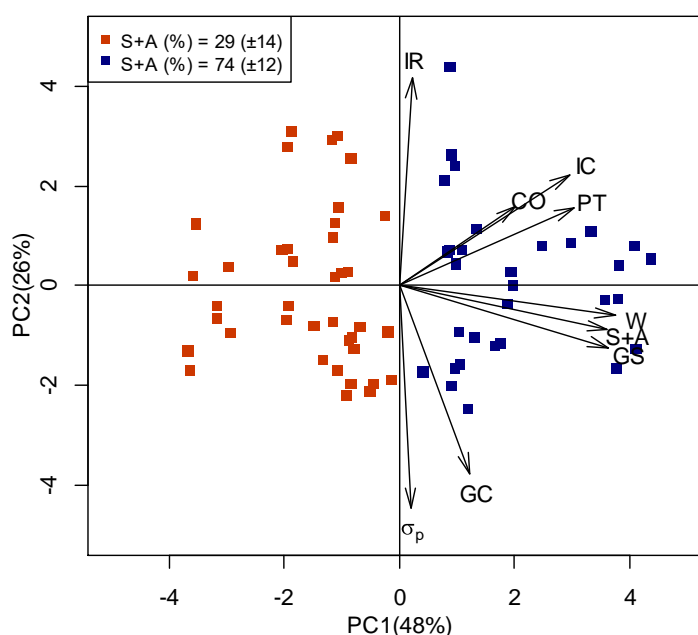
GC= Grau de Compactação; GS= Grau de Saturação; RP= Resistência Mecânica à Penetração;  $\sigma_p$ = Tensão de Pré-consolidação;  $W_{100cca}$ = Umidade sob tensão de 10 kPa; PT= Porosidade total; CO= Carbono Orgânico.

Muito embora, Naderi-Boldajia; Keller (2016) afirmaram que o limite superior do GC é 87%, e que acima desse percentual, o desenvolvimento das plantas se torna crítico. Mentges et al. (2016) afirmaram que o limiar inferior é 77%. Sendo assim, os solos: LA<sub>1</sub>, GX<sub>1</sub> e GX<sub>2</sub> apresentaram-se acima desse limite crítico superior e LA<sub>3</sub> abaixo do limite crítico inferior na camada de 0,00-0,20 m. Por sua vez, na camada de 0,20-0,40 m, o comprometimento aos cultivos foi apresentado nos solos: LA<sub>1</sub>, PA<sub>3</sub>, GX<sub>1</sub> e LA<sub>2</sub>. Os valores de GC na faixa ideal (77-87%) são mais recomendáveis, pois, o GC muito abaixo do limite mínimo pode restringir a retenção de água no solo e causar efeitos nos rendimentos dos cultivos (MENTGES et al., 2016).

A RP variou de 1,2 a 7,59 MPa e 2,30 a 5,59 MPa nas camadas de 0,00-0,20 m e 0,20-0,40 m, respectivamente (Tabela 4). Os maiores valores encontrados foram nos solos LA<sub>2</sub> e GX<sub>2</sub>. Notadamente, esses solos são os que possuem maior tempo de colheitas sucessivas (7° e 17° corte, respectivamente).

Diversos fatores atuam sobre a RP, sobretudo, umidade do solo, granulometria, estrutura, agregação das partículas e densidade aparente (OTTO et al., 2011; LIMA et al., 2013). A RP acima de 2 MPa reduz o crescimento da malha radicular das plantas (OTTO et al., 2011), ou seja, na camada superficial, as raízes das plantas podem estar comprometidas nos solos: LA<sub>1</sub>, GX<sub>2</sub>, LA<sub>2</sub> e LA<sub>3</sub> e na camada subsuperficial em todos os solos.

Ainda baseado na Tabela 4, observa-se que a retenção de água nos solos (W) variou 6,93 a 50,31% e de 5,15 a 53,84% nas camadas de 0,00-0,20 m e 0,20-0,40 m, respectivamente (Tabela 4). O conteúdo de água foi incrementado em função da soma dos teores de Silte + Argila para ambas as camadas avaliadas, bem como, houve relação com a PT e o GS, ou seja, quanto maior W, maior foi a PT e o GS. O incremento no teor de argila proporciona acréscimo na porosidade total, retenção de água e redução da densidade aparente, porém, a suscetibilidade aumenta, bem como, o risco de compactação adicional se torna mais previsível com o tráfego intenso de máquinas agrícolas (SEVERIANO et al., 2013). Com base na relação entre as variáveis W, GS e silte + argila, nos componentes principais, elaborou-se a Figura 5, agrupando os componentes em função da soma dos teores de silte + argila.



**Figura 5.** Análise dos componentes principais demonstrando a relação entre os múltiplos fatores, nos distintos solos analisados, separados de acordo com o teor de Silte + Argila independente da camada avaliada.

$\sigma_p$  = Tensão de Pré-consolidação (kPa); IC=Índice de compressão (-); IR= Índice de Recompressão (-); S+A= Silte + Argila ( $\text{g kg}^{-1}$ ); W= Umidade sob tensão de 10 kPa (%); GC= Grau de Compactação (%); GS= Grau de Saturação (%); PT= Porosidade total ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ); CO= Carbono Orgânico ( $\text{g kg}^{-1}$ ).

Independentemente da camada avaliada, ou sucessivas colheitas, houve uma separação dos parâmetros físico-mecânicos em função dos teores de silte + argila (Figura 5). Nota-se que as variações nas propriedades físico-mecânicas dos solos foram alteradas, sobretudo, pela sua textura, modificando o comportamento compressivo dos solos. Solos com teores de silte + argila de  $29 \pm 14\%$  apresentaram menor CO, IC, PT, W, GS em relação aos solos com teores de silte + argila de  $74 \pm 12\%$ . Assim, os solos

com altos teores de finos possuem elevada PT, W e GS e são mais compressíveis, assim como, mais susceptíveis ao processo de compactação com o acréscimo do teor de água no solo (IMHOFF et al., 2016). O IC variou de 0,11 a 0,44 (Tabela 4), semelhantes aos valores encontrados por Imhof et al. (2016), Keller et al. (2011) e Reichert et al. (2018) que avaliaram solos com ampla variação de textura. Observou-se que o vetor do IC aumentou com o CO, W e teor de silte + argila (Figura 5). Dessa forma, solos com elevados teores silte + argila são mais compressíveis em relação aos solos mais arenosos.

Imhoff et al. (2016) encontraram mesma relação entre o IC e valores de silte + argila em solos da Província de Santa Fé (Argentina) utilizados com ampla variedade de textura, matéria orgânica e densidade do solo e também, Gregory et al., (2006) ao avaliarem solos com variação textural (14 – 75% argila) no Reino Unido, apresentando maiores IC para solos com alto teor de argila, ilustrando a maior compressibilidade desses.

Ao avaliarem uma área cultivada com cana-de-açúcar no Estado do São Paulo, com três tipos de solos e ampla variação textural (15,3 – 61,5% argila) e matéria orgânica (25,11 – 50,22 g kg<sup>-1</sup>), Imhoff et al. (2004) obtiveram aumento linear do IC até 30% do teor de argila e, a partir desse, manteve-se constante, semelhante aos avaliados, porém, houve crescimento linear em função do acréscimo do teor de silte + argila.

O IC representa a tangente do ângulo formado na reta de compressão virgem, extraída do ensaio de adensamento unidimensional e está associado aos solos mais propensos ao processo compressivo, sendo empregado como uma medida para prever a suscetibilidade do solo à compactação (KONDO; DIAS JÚNIOR, 1999; LIMA et al., 2018). Portanto, os solos com elevados teores de silte + argila, naturalmente, apresentam maior suscetibilidade a compressão em relação aos de elevada fração areia. Solos argilosos são mais compressíveis que os arenosos (IMHOFF et al., 2004).

Esse processo se dá em função da maior abundância de microporos e ação da adesão entre os finos e água, de maneira tal, a quantidade de poros contida com água é maior quando submetidos a mesma tensão matricial em relação a solos arenosos (BRAGA et al., 2015). O tráfego de máquinas agrícolas deve ser bem racional nesses solos, pois, podem comprometer o crescimento e desenvolvimento das culturas ao longo do tempo, sobretudo, em elevados GS.

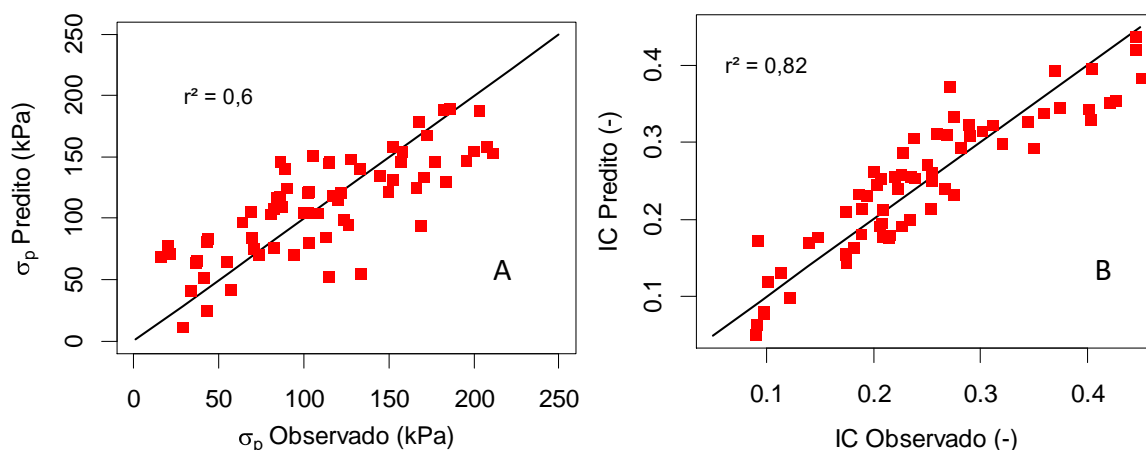
Com base nos dados, Tabelas 3 e 4, propõem-se modelos de regressões lineares múltiplas que expressam valores negativos e positivos para prever a capacidade de carga dos solos, bem como, a suscetibilidade desses ao processo de compactação. Os modelos foram propostos para predição da  $\sigma_p$  e o IC geral, mas também, de acordo com a soma

dos teores de silte + argila para os distintos solos cultivados com cana-de-açúcar avaliados (Tabela 5).

**Tabela 5.** Modelos lineares para estimativa da  $\sigma_p$  e IC geral e de acordo com a soma dos teores de silte + argila dos solos cultivados com cana-de-açúcar avaliados.

Modelo Linear	R <sup>2</sup>
$\sigma_p = -571,78 + 629,47PT^{***} + 3,46GS^{***} + 5,55GC^{***} - 0,54S\_A^{***} + 0,37A^{***} - 5,72CO^{***}$	0,60
$IC = 0,61 - 0,0018GS^* - 0,0073GC^{***} + 0,00041S\_A^{***} + 0,0088CO^{***}$	0,82
$\sigma_{p_{29}} = 579,27 - 858,137PT^{***} - 5,91 CO^{***}$	0,63
$IC_{29} = 0,317 + 0,00162GS^* - 0,00385GC^{***} + 0,00865CO^{***}$	0,81
$\sigma_{p_{74}} = -1079,02 + 1333,4PT^* + 3,23GS^* + 9,2GC^* - 0,75S\_A^{***} + 0,4A^* - 7,82CO^*$	0,76
$IC_{74} = -0,580 + 1,967PT^{***} - 0,00246GS^{***}$	0,82

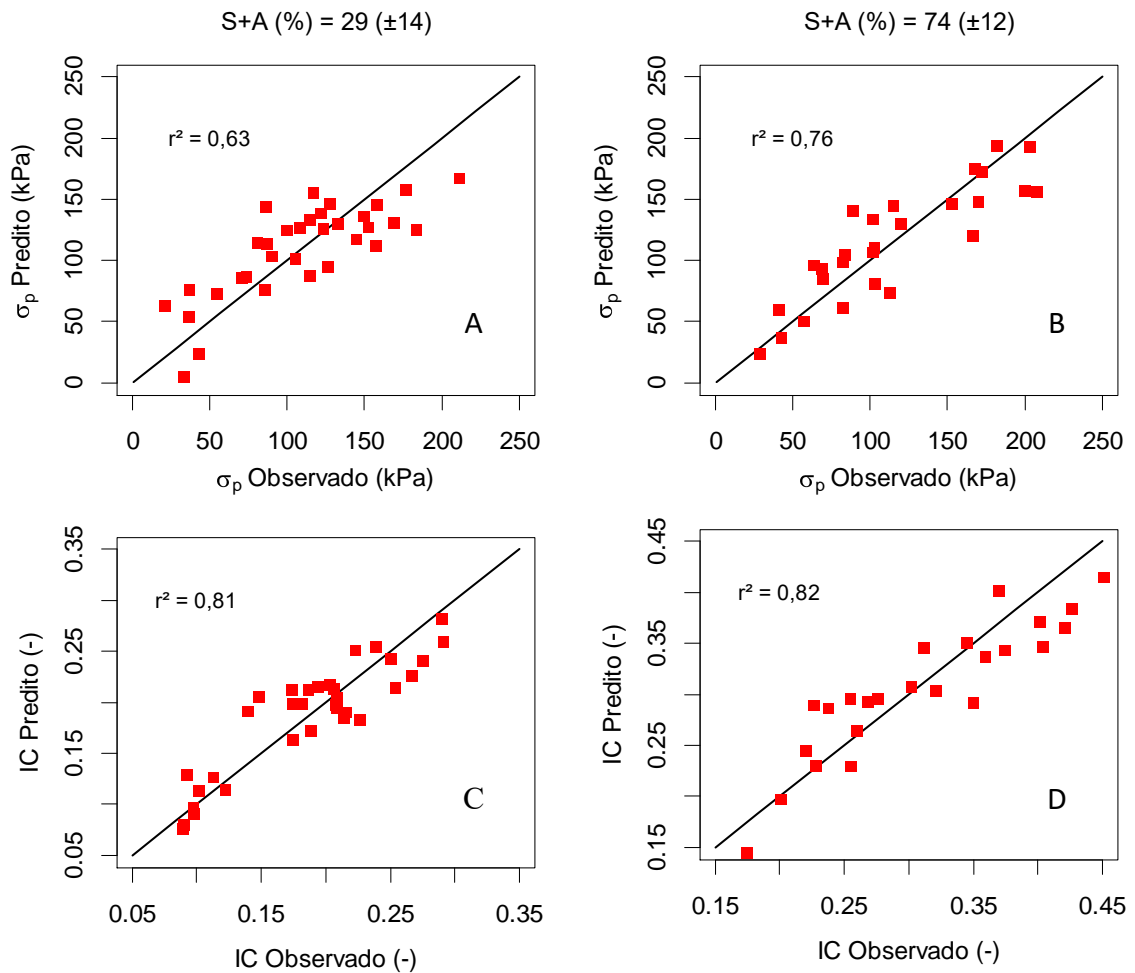
\*\*\*  $p$ -value < 0,0001; \*\*  $p$ -value < 0,001; \*  $p$ -value < 0,05;  $\sigma_p$  = Tensão de Pré-consolidação (kPa); IC = Índice de compressão; S+A = Silte + Argila (g kg<sup>-1</sup>); GC = Grau de Compactação (%); GS = Grau de Saturação (%); PT = Porosidade total (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>); CO = Carbono Orgânico (g kg<sup>-1</sup>).



**Figura 6.** Comparação dos valores de  $\sigma_p$  e IC geral (A, B), respectivamente, estimados nos modelos ajustados versus os medidos experimentalmente com base numa linha 1:1

O modelo como  $\sigma_p$  e IC geral explicou 60 e 82% da variação de  $\sigma_p$  e IC para os solos, respectivamente. Esse comportamento é mostrado na Figura 6. Enquanto, o modelo para  $\sigma_{p_{29}}$  e  $IC_{29}$  explicou 63 e 81% da variação de  $\sigma_p$  e IC para os solos (Figura 7 A e C), respectivamente. Por fim, o modelo para  $\sigma_{p_{74}}$  e  $IC_{74}$  explicou 76 e 82% da variação de  $\sigma_p$  e IC para os solos (Figura 7 B e D).

Para todos os ajustes, os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) foram acima de 50%, entretanto, o ideal seria que fossem acima de 90%. Os erros podem estar associados as metodologias propostas, erros laboratoriais e humanos para a estimativa das variáveis, bem como, a ausência de fatores inerentes a outras variáveis físico-mecânicas (MENDES et al., 2019).



**Figura 7.** Comparação dos valores de  $\sigma_{p29}$ ,  $\sigma_{p74}$ ,  $IC_{29}$  e  $IC_{74}$  (A, B, C, D), respectivamente, estimados nos modelos ajustados versus os medidos experimentalmente com base numa linha 1:1.

Ao compararmos os modelos obtidos com cinco distintas classes de solos, aos de Imhoff et al. (2004), trabalhando um Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar numa topossequência, que propuseram um modelo tendo grande variabilidade textural e de carbono orgânico, onde as variáveis explicativas foram a densidade do solo, teor de argila e umidade; obtiveram explicação de 70% na predição da  $\sigma_p$  e 90% para o IC, corroborando com os obtidos.

Saffih-Hdadi et al. (2009) sugeriram modelos com utilização de variáveis explicativas: textura, densidade e umidade em solos, utilizando solos com ampla variedade textural, carbono orgânico, cultivos e manejos na França; obtendo 88% de explicação na textura muito fina e 95% para textura fina na predição da  $\sigma_p$ . Já para o IC,

95% de explicação na textura muito fina e 98% para textura fina na sua predição. Assim avaliação dos modelos separados em função da textura promoveu maior precisão nos modelos em relação ao geral, corroborando com os valores obtidos.

Para a estimativa da  $\sigma_p$ , Severiano et al. (2010) propuseram um modelo de ajuste não linear para um Latossolo Vermelho-Amarelo e um Cambissolo Háplico ambos sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar. As variáveis explicativas dos modelos foram umidade e densidade do solo. Esses modelos estimaram a  $\sigma_p$  em 83% no Latossolo Vermelho-Amarelo em 72% o Cambissolo Háplico.

Corroborando com os resultados obtidos, com solos com ampla variedade de textura, matéria orgânica e densidade do solo, Imhoff et al. (2016) propuseram um modelo para a predição da compactação, onde as variáveis explicativas foram umidade, densidade do solo, silte + argila e carbono orgânico. A explicação descrita desses autores foi de 77% para o IC e a  $\sigma_p$ . Esse modelo foi o que mais se aproximou no coeficiente de determinação e variáveis explicativas na predição.

Com quatro distintos solos, cultivos, texturas, graus de compactação e teores de carbono orgânico, no Estado do Rio Grande do Sul, Reichert et al. (2018) modelaram a  $\sigma_p$  e o IC em quatro tensões matriciais 6, 10, 33 e 100 kPa. Na tensão de 10 kPa, com um modelo de regressão simples, utilizando apenas a densidade do solo como variável explicativa, para a  $\sigma_p$  e o IC o modelo previu 57% e 86%, respectivamente. Esses resultados reforçam os valores obtidos, pois há similaridade entre os valores, porém, os alcançados são acrescidos de mais variáveis explicativas nos modelos de predição na capacidade de suporte de cargas.

Na literatura encontra-se diversos modelos lineares e não lineares para a predição da compactação de solos agrícolas como: Dias Júnior (1994), Ajayi et al. (2009b), Oliveira et al. (2011), Pacheco e Cantalice (2011), Iori et al. (2012), Pires et al. (2012), Severiano et al. (2013), Ortigara et al. (2015), Lima et al. (2015), Mendes et al. (2019) e entre outros. Esses, são amplamente práticos para a estimativa da predição da compactação. Porém, são empregados apenas para uma restrita gama de solos e manejo, bem como, poucas variáveis explicativas inseridas nos modelos, normalmente: umidade, densidade do solo e resistência mecânica à penetração. A  $\sigma_p$  e IC possuem ligações com diversos outros atributos físico-mecânicos do solo, fazendo com que novos modelos possam ser sugeridos para um manejo racional da mecanização agrícola.

Diferentemente dos modelos lineares e não lineares já disponíveis na literatura, os modelos sugeridos apresentam amplos usos, pois, apresentam grande variedade textural

(43,75 – 945,00 g kg<sup>-1</sup> silte + argila), CO (9,8 – 26,52 g kg<sup>-1</sup>), GC (75,18 – 95,46%), GS (11,18 – 91,7%) e PT (39,45 – 58,72%), bem como, distintas classes de solo e manejo. Assim, os modelos propostos possuem maior quantidade de variáveis e podem ser empregados em diversos cenários de predição.

O CO foi a variável que mais contribuiu em todos os modelos propostos. Dessa forma, para  $\sigma_p$ , com acréscimo do CO, há redução da  $\sigma_p$ . Essa relação já foi descrita por diversos autores analisando diversos solos (KONDO; DIAS JÚNIOR, 1999; PACHECO; CANTALICE, 2011; OLIVEIRA et al., 2011; LIMA et al. 2015).

Com relação ao índice de compressão, essa relação do CO foi o inverso do descrito em relação a  $\sigma_p$ . Quanto maior o teor de CO, maior também foi a facilidade com que esse solo se comprimiu. Esses resultados corroboram com Lima et al. (2015), Pereira et al., (2007) e Braida et al. (2010) afirmando que o acréscimo de CO implica numa maior suscetibilidade ao processo compressivo, além da maior retenção de água no solo, elevando o GS. A relação positiva do CO e o IC, juntamente a relação negativa do CO e  $\sigma_p$  indicam que solos com altos teores de CO são facilmente compactados, porém, são mais resilientes ao processo (REICHERT et al., 2018).

## 7. CONCLUSÃO

O comportamento compressivo dos solos foi independente do tempo de cultivo e da profundidade avaliada.

O IC aumentou com o acréscimo do teor de CO, PT, Silte + Argila, W e GS.

Solos com altos teores de silte + argila possuem maior capacidade de suporte de carga, porém, são mais susceptíveis ao processo de compactação.

A variação de  $\sigma_p$  e IC para os solos foram estimados pelos modelos matemáticos propostos. A depender da textura, os modelos possuem maior acurácia na estimativa  $\sigma_p$  e IC.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Accioly, L. D. O.; Silva, A. B.; Lopes, H.; Silva, E. A.; Silva, J. A.; Alves, E. D. S.; Irmão, R. A.; Cavalcanti Júnior, E. A. Análise do relevo e suas relações com o uso, a cobertura e a aptidão agrícola para cana-de-açúcar na Zona da Mata Sul de Pernambuco. Embrapa Solos-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E), 2012,
- Ajayi, A. E.; Dias Júnior, M. D. S.; Curi, N.; Araujo Júnior, C. F.; Souza, T. T. T.; Inda Júnior, A. V. Strength attributes and compaction susceptibility of Brazilian Latosols. Soil and Tillage Research, v. 105, p. 122-127, 2009a.
- Ajayi, A. E.; Dias Júnior, M. S.; Curi, N.; Araújo Júnior, C. F.; Aladenola, O. O.; Souza, T. T.; Inda Junior, A. A. Comparison of estimation methods of soil strength in five soils. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.33, p.487-495, 2009b.
- Albuquerque, A. P. C.; Bastos, G. Q.; Dutra Filho, J. A.; Simões Neto, D. E.; Silva, L. J.; Souto, L. S. Comportamento de genótipos de maturação precoce de cana-de-açúcar na Zona da Mata de Pernambuco. Comunicata Scientiae, v. 7, p. 311-318, 2016.
- Araújo Filho, J. C.; Burgos, N.; Lopes, O. F.; Silva, F. H. B. B.; Medeiros, L.A.R.; Melo Filho, H. F. R.; Parahyba, R. B. V.; Cavalcanti, A. C.; Oliveira Neto, M. B.; Rodrigues, E. Silva, F. B.; Leite, A. P.; Santos, J. C. P.; Sousa Neto, N. C.; Silva, A. B.; Luz, L.R,Q,P;; Lima, P. C.; Reis, R. M. G.; Barros, A. H. C. Levantamento de reconhecimento de baixa e média intensidade dos solos do Estado de Pernambuco, Embrapa Solos, 2000, 378p.
- Assis, R. L. D.; Lazarini, G. D.; Lanças, K. P.; Cargnelutti Filho, A. Avaliação da resistência do solo à penetração em diferentes solos com a variação do teor de água. Engenharia Agrícola, v. 29, p. 558-568, 2009.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR 12007: Solo: Ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro, 1990, 13p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR 7182: Solo, Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986, 11p.
- Barbosa, L. C.; Souza, Z. M.; Franco, H. C. J.; Otto, R.; Rossi Neto, J.; Garside, A. L.; Carvalho, J. L. Soil texture affects root penetration in Oxisols under sugarcane in Brazil. Geoderma Regional, v. 13, p. 15-25, 2018.
- Bennett, J. M.; Robertson, S. D.; Marchuk, S.; Woodhouse, N. P.; Antille, D. L.; Jensen, T. A.; Keller, T. The soil structural cost of traffic from heavy machinery in Vertisols. Soil and Tillage Research, v. 185, p. 85-93, 2019.



- Blanco-Canqui, H.; Ruis, S. J. No-tillage and soil physical environment. *Geoderma*, v. 326, p. 164-200, 2018.
- Bordonal, R. O.; Carvalho, J. L. N.; Lal, R.; Figueiredo, E. B.; Oliveira, B. G.; La Scala Junior, N. Sustainability of sugarcane production in Brazil, A review. *Agronomy for Sustainable Development*, v. 38, p. 13, 2018.
- Braga, F. D. V. A.; Reichert, J. M.; Mentges, M. I.; Vogelmann, E. S.; Padrón, R. A. R. Propriedades mecânicas e permeabilidade ao ar em topossequência de um Argissolo-Gleissolo: variação no perfil e efeito de compressão. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 39, p. 1025-1035, 2015.
- Braida, J. A.; Reichert, J. M.; Reinert, D. J.; Sequinato, L. Elasticidade do solo em função da umidade e do teor de carbono orgânico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, p. 477-485, 2008.
- Braida, J. A.; Reichert, J. M.; Reinert, D. J.; Veiga, M. D. Teor de carbono orgânico e a susceptibilidade à compactação de um Nitossolo e um Argissolo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 14, n. 2, p. 131-139, 2010.
- Carvalho, V. S. D.; Ribeiro, M. R.; Souza Júnior, V. S. D.; Brilhante, S. A. Caracterização de Espodossolos dos Estados da Paraíba e de Pernambuco, Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 37, p. 1454-1463, 2013.
- Castioni, G. A.; Cherubin, M. R.; Menandro, L. M. S.; Sanches, G. M.; Bordonal, R. O.; Barbosa, L. C.; Franco, H. C. J.; Carvalho, J. L. N. Soil physical quality response to sugarcane straw removal in Brazil: A multi-approach assessment. *Soil and Tillage Research*, v. 184, p. 301-309, 2018.
- Chamen, W. T.; Moxey, A. P.; Towers, W.; Balana, B.; Hallett, P. D. Mitigating arable soil compaction: A review and analysis of available cost and benefit data. *Soil and Tillage Research*, v. 146, p. 10-25, 2015.
- Cherubin, M. R.; Karlen, D. L.; Franco, A. L.; Tormena, C. A.; Cerri, C. E.; Davies, C. A.; Cerri, C. C. Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. *Geoderma*, v. 267, p. 156-168, 2016.
- Colombi, T.; Keller, T. Developing strategies to recover crop productivity after soil compaction - A plant eco-physiological perspective. *Soil and Tillage Research*, v. 191, p. 156-161, 2019.
- Conab, Companhia Nacional de Abastecimento, Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar. v. 6 - safra 2019/20 - Segundo levantamento, agosto 2019.

- Corrêa, M. M.; Ker, J. C.; Araújo Filho, J. C.; Camêlo, D. D. L. Formas de ferro, silício e, ou, alumínio na gênese de fragipãs e horizontes coesos dos Tabuleiros Costeiros, *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 39, p. 940-949, 2015.
- Corrêa, M. M.; Ker, J. C.; Barrón, V.; Torrent, J.; Curi, N.; Torres, T. C. P. Caracterização física, química, mineralógica e micromorfológica de horizontes coesos e fragipãs de solos vermelhos e amarelos do ambiente Tabuleiros Costeiros. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, p. 297-313, 2008.
- CPRM, Serviço geológico do Brasil, 2005. Projeto Cadastro de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea – Pernambuco, Recife.
- Curi, N.; Ker, J. C.; Novais, R. F.; Torrad, P, V.; Schaefer, C. E. G. R. Pedologia: solos dos biomas brasileiros. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2017, 597 p.
- Dias Júnior, M. S. Compression of three soils under longterm tillage and wheel traffic. 1994. 114f. Tese (Doutorado) - Michigan State University, East Lansing. 1994.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análises de Solos. 3ª edição, Rio de Janeiro, 2017, 573 p.
- FAO, ITPS. Status of the World's Soil Resources (SWSR)–Main Report, Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils. Rome, Italy, v. 650, 2015.
- Furtado, A. T.; Scandiffio, M. I. G.; Cortez, L. A. B. The Brazilian sugarcane innovation system. *Energy Policy*, v. 39, p. 156-166, 2011.
- Gregory, A. S.; Whalley, W. R.; Watts, C. W.; Bird, N, R, A.; Hallett, P. D.; Whitmore, A. P. Calculation of the compression index and precompression stress from soil compression test data. *Soil and Tillage Research*, v. 89, p. 45-57, 2006.
- Guimarães Júnnyor, W. D. S. G.; Maria, I. C. D.; Araujo Junior, C. F.; Lima, C. C.; Vitti, A. C.; Figueiredo, G. C.; Dechen, S. C. F. Soil compaction on traffic lane due to soil tillage and sugarcane mechanical harvesting operations, *Scientia Agricola*, v. 76, p. 509-517, 2019.
- Hamza, M. A.; Anderson, W. K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research*, v. 82, p. 121-145, 2005.
- Imhoff, S.; Silva, A. P.; Fallow, D. Susceptibility to compaction, load support capacity, and soil compressibility of Hapludox. *Soil Science Society of America Journal*, v. 68, p. 17-24, 2004.

- Imhoff, Silvia.; Silva, A. P.; Ghiberto, P. J.; Tormena, C. A.; Pilatti, M. A.; Libardi, P. L. Physical quality indicators and mechanical behavior of agricultural soils of Argentina. *PloS One*, v. 11, p. e0153827, 2016.
- Iori, P.; Silva, R. B.; Dias Junior, M. S.; Lima, J. M. Pressão de pré-consolidação como ferramenta de análise da sustentabilidade estrutural de Cambissolo Haplico, Argissolo Amarelo e Gleissolo Haplico em Registro, SP. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.36, p.1448-1456, 2012.
- Keller, T. Lamandé, M.; Schjonning, P.; Dexter, A. R. Analysis of soil compression curves from uniaxial confined compression tests. *Geoderma*, v. 163, p. 13-23, 2011.
- Keller, T.; Berli, M.; Ruiz, S.; Lamandé, M.; Arvidsson, J.; Schjonning, P.; Selvadurai, A. P. Transmission of vertical soil stress under agricultural tyres: Comparing measurements with simulations. *Soil and Tillage Research*, v. 140, p. 106-117, 2014.
- Kondo, M. K.; Dias Júnior, M. S. Efeito do manejo e da umidade no comportamento compressivo de três Latossolos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 23, p. 497-506, 1999.
- Lima Neto, J. A.; Ribeiro, M. R.; Corrêa, M. M.; Souza Júnior, V. S.; Araújo Filho, J.; Lima, J. F. W. F. Atributos químicos, mineralógicos e micromorfológicos de horizontes coesos de Latossolos e Argissolos dos tabuleiros costeiros do estado de Alagoas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34 p. 473-486, 2010.
- Lima Neto, J. A.; Rosas, M. R.; Corrêa, M. M.; Souza Júnior, V. S.; Lima, J. F. W.; Ferreira, R. F. A. L. Caracterização e gênese do caráter coeso em Latossolos Amarelos e Argissolos dos Tabuleiros Costeiros do estado de Alagoas. *Revista Brasileira de Ciência do solo*, v. 33, p. 1001-1011, 2009.
- Lima, C. L. R.; Silva, A. P.; Imhoff, S.; Leão, T. P. Estimativa da capacidade de suporte de carga do solo a partir da avaliação da resistência à penetração. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 30, p. 217-223, 2006.
- Lima, R. P. Modelos de capacidade de suporte de carga e suas relações com atributos físicos e mecânicos em Argissolo Amarelo distrocoeso. 2013. 58p. Dissertação (Mestrado Engenharia Agrícola). Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife
- Lima, R. P.; Keller, T. Impact of sample dimensions, soil-cylinder wall friction and elastic properties of soil on stress field and bulk density in uniaxial compression tests. *Soil and Tillage Research*, v. 189, p. 15-24, 2019.
- Lima, R. P.; León, M. J.; Silva, A. R. Compactação do solo de diferentes classes texturais em áreas de produção de cana-de-açúcar. *Ceres*, v. 60, p. 16-20 2013.

- Lima, R. P.; Rolim, M. M.; Oliveira, V. S.; Silva, A. R.; Pedrosa, E. M. R.; Ferreira, R. L. Load-bearing capacity and its relationships with the physical and mechanical attributes of cohesive soil. *Journal of Terramechanics*, v. 58, p. 51-58, 2015.
- Lima, R. P.; Silva, A. P.; Giarola, N. F.; Silva, A. R.; Rolim, M. M. Changes in soil compaction indicators in response to agricultural field traffic. *Biosystems Engineering*, v. 162, p. 1-10, 2017.
- Lisboa, I. P.; Cherubin, M. R.; Satiro, L. S.; Siqueira Neto, M.; Lima, R. P.; Gmach, M. R.; Cerri, C. E. Applying Soil Management Assessment Framework (SMAF) on short-term sugarcane straw removal in Brazil. *Industrial Crops and Products*, v. 129, p. 175-184, 2019.
- Macedo, V. R. M.; Silva, A. J. N.; Cabeda, M. S. V. Compressibilidade de um Argissolo Vermelho fisicamente degradado e recuperado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 14, p. 812-818, 2010a.
- Macedo, V. R. M.; Silva, A. J. N.; Cabeda, M. S. V. Influência de tensões compressivas na pressão de pré-compactação e no índice de compressão do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 14, p. 856-862, 2010b.
- Marasca, I.; Lemos, S. V.; Silva, R. B.; Guerra, S. P. S.; Lanças, K. P. Soil compaction curve of an Oxisol under sugarcane planted after in-row deep tillage. *Revista Brasileira de Ciência do solo*, v. 39, p. 1490-1497, 2015.
- Marcelo, V. F.; Almeida, B. G.; Araújo Filho, J. C.; Souza, W. L. S. Disponibilidade hídrica de solo coeso sob a ação de poliácridamida: qualidade física ambiental. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, p. 12-25, 2016.
- Mendes, P. M. B.; Rolim, M. M.; Lima, R. P.; Pedrosa, E. M.; Tavares, U. E.; Simões Neto, D. E. Estimation of precompression stress in an Ultisol cultivated with sugarcane. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 23, p. 336-340, 2019.
- Mentges, M. I.; Reichert, J. M.; Rodrigues, M. F.; Awe, G. O.; Mentges, L. R. Capacity and intensity soil aeration properties affected by granulometry, moisture, and structure in no-tillage soils. *Geoderma*, v. 263, p. 47-59, 2016.
- Mossadeghi-Björklund, M.; Jarvis, N.; Larsbo, M.; Forkman, J.; Keller, T. Effects of compaction on soil hydraulic properties, penetration resistance and water flow patterns at the soil profile scale. *Soil Use and Management* v. 35, p. 367-377, 2019.
- 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.

- Obour, P. B.; Schjonning, P.; Peng, Y.; Munkholm, L. J. Subsoil compaction assessed by visual evaluation and laboratory methods. *Soil and Tillage Research*, v. 173, p. 4-14, 2017.
- Oliveira, D. M. S.; Paustian, K.; Cotrufo, M. F.; Fiallos, A. R.; Cerqueira, A. G.; Cerri, C. E. P. Assessing labile organic carbon in soils undergoing land use change in Brazil: A comparison of approaches. *Ecological Indicators*, v. 72, p. 411-419, 2017.
- Oliveira, V. S.; Rolim, M. M.; Costa, Y. D. J.; Pedrosa, E. M. R.; Silva, E. F. F. Compressibilidade de um Argissolo Amarelo Distrocoeso submetido a diferentes manejos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, p. 435-442, 2011.
- Oliveira, V. S.; Rolim, M. M.; Vasconcelos, R. F.; Costa, Y. D.; Pedrosa, E. M. Compactação de um Argissolo Amarelo distrocoeso submetido a diferentes manejos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 14, p. 914-920, 2010.
- Ortigara, C.; Moraes, M. T. D.; Debiasi, H.; Silva, V. R. D.; Franchini, J. C.; Luz, F. B. D. Modeling of soil load-bearing capacity as a function of soil mechanical resistance to penetration. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 39, p. 1036-1047, 2015.
- Otto, R.; Silva, A. P.; Franco, H. C. J.; Oliveira, E. C. A.; Trivelin, P. C. O. High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. *Soil and tillage research*, v. 117, p. 201-210, 2011.
- Pacheco, E. P.; Cantalice, J. R. B. Compressibilidade, resistência a penetração e intervalo hídrico ótimo de um Argissolo Amarelo cultivado com cana-de-açúcar nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, p. 403-415, 2011.
- Pereira, J. O.; Défossez, P.; Richard, G. Soil susceptibility to compaction by wheeling as a function of some properties of a silty soil as affected by the tillage system. *European Journal of Soil Science*, v. 58, p. 34-44, 2007.
- Pires, B. S.; Dias Junior, M. D. S.; Rocha, W. W.; Araújo Junior, C. F.; Carvalho, R. D. C. R. Modelos de capacidade de suporte de carga de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob diferentes usos e manejos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 36, p. 635-642, 2012.
- Pöhlitz, J.; Rücknagel, J.; Koblenz, B.; Schlüter, S.; Vogel, H. J.; Christen, O. Computed tomography and soil physical measurements of compaction behaviour under strip tillage, mulch tillage and no tillage. *Soil and Tillage Research*, v. 175, p. 205-216, 2018.
- R, Core Team R: A Language and Environment for Statistical Computing [internet] R Foundation for statistical computing, 2016.

- Reichert, J. M.; Mentges, M. I.; Rodrigues, M. F.; Cavalli, J. P.; Awe, G. O.; Mentges, L. R. Compressibility and elasticity of subtropical no-till soils varying in granulometry organic matter, bulk density and moisture. *Catena*, v. 65, p. 345-357, 2018.
- 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, p. 242-254, 2009.
- Roboredo, D.; Maia, J. D. S.; Oliveira, O. D.; Roque, C. G. Uso de dois penetrômetros na avaliação da resistência mecânica de um Latossolo Vermelho distrófico. *Engenharia Agrícola*, v. 30, p. 308-314, 2010.
- Rodríguez, L. A.; Valencia, J. J.; Urbano, J. A. Soil compaction and tires for harvesting and transporting sugarcane. *Journal of Terramechanics*, v. 49, p. 183-189, 2012.
- Saffih-Hdadi, K.; Défossez, P.; Richard, G.; Cui, Y.J.; Tang, A.M.; Chaplain, V. A Method for predicting soil susceptibility to the compaction of surface layers as a function of water content and bulk density. *Soil and Tillage Research*, v.105, p.96-103, 2009.
- Salles Filho, S. L. M.; Castro, P. F. D.; Bin, A.; Edquist, C.; Ferro, A. F. P.; Corder, S. Perspectives for the Brazilian bioethanol sector: The innovation driver. *Energy Policy*, v. 108, p. 70-77, 2017.
- Santos, F. A.; Borém, A. *Cana-de-açúcar: do plantio à colheita*. 257p. Viçosa, Minas Gerais, 2013.
- Scarpore, F. V.; Van Lier, Q. D. J.; Camargo, L.; Pires, R. C. M.; Ruiz-Corrêa, S. T.; Bezerra, A. H. F.; Gava, G. J. C.; Dias, C. T. D. Tillage effects on soil physical condition and root growth associated with sugarcane water availability. *Soil and Tillage Research*, v. 187, p. 110-118, 2019.
- Severiano, E. C.; Dias Júnior, M. D. S.; Castro, M. B. D.; Oliveira, L. F.; Costa, K. A. D. P. Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar: II-quantificação das restrições às funções edáficas do solo em decorrência da compactação prejudicial. *Engenharia Agrícola*, v. 30, p. 414-423, 2010.
- Severiano, E. C.; Oliveira, G. C.; Dias Junior, M. D. S.; Curi, N.; Pinho Costa, K. A. P.; Carducci, C. E. Preconsolidation pressure, soil water retention characteristics, and texture of Latosols in the Brazilian Cerrado. *Soil Research*, v. 51, p. 193-202, 2013.
- Severiano, E. D. C.; Oliveira, G. C. D.; Dias Júnior, S. M.; Costa, K. A. D. P.; Benites, V. D. M.; Ferreira Filho, S. M. Structural changes in latosols of the cerrado region: II-soil compressive behavior and modeling of additional compaction. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, p. 783-791, 2011.

- Signor, D.; Czycza, R. V.; Milori, D. M. B. P.; Cunha, T. J. F.; Cerri, C. E. P. Atributos químicos e qualidade da matéria orgânica do solo em sistemas de colheita de cana-de-açúcar com e sem queima. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 51, p. 1438-1448, 2016.
- Silva, A. J. N.; Cabeda, M. S. V. Compactação e compressibilidade do solo sob sistemas de manejo e níveis de umidade. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 30, p. 921-930, 2006.
- Simões Neto, D. E.; Oliveira, A. C.; Rocha, A. T.; Freire, F. J.; Freire, M. G. B. S.; Nascimento, C. W. A. Características agroindustriais da cana-de-açúcar em função da adubação fosfatada, em solos de Pernambuco. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 16, p. 347-354, 2012.
- Sivarajan, S.; Maharlooei, M.; Bajwa, S. G.; Nowatzki, J. Impact of soil compaction due to wheel traffic on corn and soybean growth, development and yield. *Soil and Tillage Research*, v. 175, p. 234-243, 2018.
- Smith, D. M.; Inman-bamber, N. G.; Thorburn, P. J. Growth and function of the sugarcane root system. *Field Crops Research*, v. 92, p. 169-183, 2005.
- Sousa, A. C. M.; Farhate, C. V. V.; Souza, Z. M.; Torres, J. L. R.; Silva, R. B. Soil Load-Bearing Capacity and Development of Root System in Area Under Sugarcane with Traffic Control in Brazil. *Sugar Tech*, v. 21, p. 153-161, 2019.
- Souza, W. L. S. Comportamento físico-mecânico de dois solos cultivados com cana-de-açúcar em diferentes sistemas de manejo. 2015, 183p, Tese (Doutorado Ciência do Solo). Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.
- Stolf, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência de solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 15, p. 229-235, 1991.
- Tavares, U. E.; Rolim, M. M.; Pedrosa, E. M.; Montenegro, A. A.; Magalhães, A. G.; Barreto, M. T. Variabilidade espacial de atributos físicos e mecânicos de um Argissolo sob cultivo de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 16, p. 1206-1214, 2012.
- Vasconcelos, R. F. B.; Cantalice, J. R. B.; Moura, G. B. A.; Rolim, M. M.; Montenegro, C. E. V. Compressibilidade de um Latossolo Amarelo distrocoeso não saturado sob diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 36, p. 525-536, 2012.
- Vasconcelos, R. F.; Souza, E. R.; Cantalice, J. R. B.; Silva, L. S. Qualidade física de Latossolo Amarelo de Tabuleiros Costeiros em diferentes sistemas de manejo da cana-

de-açúcar. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 18, p. 381-386, 2014.

Yeomans, J. C.; Bremner, J, M. A rapid and precise method for routine organic carbon in soil. Communications in Soil Science and Plant Analysis, v. 19, p. 1467-1476, 1988.