



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO



QUALIDADE FÍSICA DO SOLO E PRODUTIVIDADE DA CANA-DE- AÇÚCAR SOB SISTEMAS DE PREPARO DO SOLO

Hernán Novelo León

Dissertação apresentada para
obtenção do título de Mestre em
Agronomia. Área de concentração:
Ciência do Solo.

RECIFE/PE
DEZEMBRO DE 2016

Hernán Novelo León
Engenheiro Agrônomo

QUALIDADE FÍSICA DO SOLO E PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-
AÇÚCAR SOB SISTEMAS DE PREPARO DO SOLO

Orientador:

Prof. Dr. Brivaldo Gomes de Almeida

Dissertação apresentada para
obtenção do título de Mestre em
Agronomia. Área de concentração:
Ciência do Solo.

RECIFE/PE
DEZEMBRO DE 2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Biblioteca Central, Recife-PE, Brasil

N939q Novelo León, Hernán
 Qualidade física do solo e produtividade da cana-de-açúcar sob
sistemas de preparo do solo / Hernán Novelo León. – 2016.
 120 f. : il.

 Orientador: Brivaldo Gomes de Almeida.
 Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de
Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo,
Recife, BR-PE, 2016.
 Inclui referências.

 1. Intervalo hídrico ótimo 2. Integral water capacity 3. Integral
energy 4. Índice S 5. Índice H 6. Disponibilidade de água no solo
7. *Saccharum* spp. I. Almeida, Brivaldo Gomes de, orient. II. Título

CDD 631.4

Hernán Novelo León

**QUALIDADE FÍSICA DO SOLO E PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-
AÇÚCAR SOB SISTEMAS DE PREPARO DO SOLO**

Dissertação apresentada para
obtenção do título de Mestre em
Agronomia. Área de concentração:
Ciência do Solo.

Recife, 19 de dezembro de 2016

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Brivaldo Gomes de Almeida

Dr. Djalma Euzébio Simões Neto

Dr. Alcione Guimarães Freire

Ofereço

Aos meus pais, Enrique Novelo e Elvia Marilín León.

Dedico

Aos meus filhos, Camila e Hernán Novelo.

À minha amada, Ana Maria.

Agradecimentos

Ao Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), pela concessão da bolsa através do Programa de Pós-Graduação em Pecuária e Agricultura Tropicais Brasil-México – PROPAT-BRASIL-MÉXICO.

Ao Tecnológico Nacional de México (TecNM), pela gestão durante o processo de concretização do PROPAT-BRASIL-MÉXICO e por ser um pilar fundamental no desenvolvimento do país.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), pela infraestrutura e suporte financeiro para o desenvolvimento das atividades próprias do Mestrado.

Ao professor Dr. Brivaldo, pela orientação e os conhecimentos transmitidos com paciência e dedicação durante o desenvolvimento deste projeto; principalmente, por acreditar e dar-me uma oportunidade.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da UFRPE, pela contribuição em minha formação acadêmica.

Aos meus colegas de orientação na UFRPE: Symone, Jéssica, Bruno, Pedro, Valério, Edivan e Thiago pelo apoio durante a pesquisa.

Aos Funcionários do Departamento de Solos da UFRPE, pela presteza em atender nossas solicitações, especialmente a Josué (*in memoriam*) e a Socorro.

À Estação Experimental de Cana-de-açúcar de Carpina (EECAC), nas pessoas do seu Diretor, Dr. Djalma Euzébio Simões Neto, pela cessão da área e apoio logístico e científico, como ao Evanílson, pelo acompanhamento e suporte ao longo de todo o experimento de campo.

Ao professor Dr. Fernando Freire, fundamental na concepção dos conceitos e discussões sobre o projeto.

Resumo

Avanços na ciência do solo têm possibilitado o desenvolvimento de indicadores que avaliam e caracterizam de forma crítica e com maior sensibilidade a qualidade física do solo em favor do crescimento da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*). O Objetivo deste trabalho foi avaliar a influência do preparo mecanizado na qualidade física do solo e no potencial de resposta da cana-de-açúcar submetida a regime de sequeiro no Estado de Pernambuco, Brasil. Foi conduzido um experimento com delineamento em blocos ao acaso, com quatro repetições. Cada bloco continha duas unidades experimentais (parcelas) e os tratamentos consistiram no sistema de manejo do solo: com preparo e sem preparo. Em laboratório (*ex situ*), foram avaliados os atributos físico-hídricos: densidade do solo, estabilidade de agregados (via úmida), porosidade total e sua distribuição por tamanho, condutividade hidráulica saturada, bem como as curvas de retenção de água no solo e resistência do solo à penetração; sendo este último também determinado em campo (*in situ*). A partir dos ensaios em laboratório, foram obtidos os dados para calcular os modelos: Água Disponível, Intervalo Hídrico Ótimo, Integral Water Capacity, Integral Energy, Índice S e Índice H. Adicionalmente, foi avaliado o potencial de resposta da cana-de-açúcar considerando parâmetros biométricos (produtividade) e tecnológicos (qualidade). Após 17 meses de sua realização, não se obteve evidencia de que o preparo mecanizado tenha favorecido propriedades estruturais do solo como densidade e agregação. No entanto, tal sistema promoveu um acréscimo na porosidade total do solo, modificando sua distribuição por tamanho. Concomitantemente, houve um aumento na condutividade hidráulica saturada do solo o que diminuiu sua capacidade de armazenagem, comprometendo a disponibilidade hídrica para a cana-de-açúcar, evidenciando e aumentando seu comportamento já coesivo. Em contrapartida, o preparo mecanizado do solo ampliou o Intervalo Hídrico Ótimo, mas não o suficiente para indicar uma boa qualidade física, sendo a resistência do solo à penetração a principal restrição. Além do mais, os valores de Integral energy foram semelhantes entre tratamentos. Com relação à cultura, o preparo mecanizado do solo não influenciou a produtividade da cana-de-açúcar nem sua qualidade.

Palavras-chave: Intervalo hídrico ótimo; Integral water capacity; Integral energy; Índice S; Índice H; Disponibilidade de água no solo; *Saccharum* spp.

Abstract

Advances in soil science have enabled the development of different approaches to assess the soil physical quality related to sugarcane (*Saccharum* spp.) growth in a more critical way. The present study aimed to evaluate the effects of conventional tillage practices on soil physical quality and the response of sugarcane under rainfed conditions in the State of Pernambuco, Brazil. A randomized block design with four replications was conducted. The experiment was laid down in a randomized block design with four replications, where each block contained two experimental units (plots) and the treatments consisted of two tillage systems: no-tillage and conventional tillage. In the laboratory (*ex situ*), some soil physical attributes were determined, such as: bulk density, aggregate stability (wet-sieving), total porosity and pore-size distribution, saturated hydraulic conductivity, as well as the soil water retention and penetration resistance curves. In the field (*in situ*), soil penetration resistance was also determined. In addition, based on the laboratory data, the following models were calculated: Available Water, Least Limiting Water Range, Integral Water Capacity, Integral energy, S-index and H-index. Furthermore, sugarcane biometrical (productivity) and technological (quality) parameters were assessed. After 17 months of its execution, no evidence was obtained that the soil tillage improved structural properties such as bulk density and aggregation. However, such system promoted an increase in soil porosity and modified its distribution. Concomitantly, there was an increase in the soil hydraulic conductivity, which reduced its storage capacity, compromising the water availability for sugarcane, evidencing and increasing the hardsetting behavior of this soil. On the other hand, the soil tillage increased the Least Limiting Water Range of the studied soil, but not enough to indicate a good physical quality, being the soil penetration resistance the main restriction. Additionally, the values of Integral energy were similar between treatments. Regarding the crop, the soil tillage did not influence the productivity of the sugarcane nor its quality.

Keywords: Least limiting water range; Integral water capacity; Integral energy; S-index; H-index; Soil water availability; *Saccharum* spp.

Lista de Abreviaturas e Siglas

AD	Água disponível do solo
APAL	<i>Agricultural Laboratory</i>
ATR	Açúcar Total Recuperável
CC	Capacidade de campo
CCRAS	Curva característica de retenção de água no solo
CIB	Conselho de Informações sobre Biotecnologia
CNA	Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CP	Com preparo de solo
CRP	Curva de resistência do solo à penetração
DMG	Diâmetro médio geométrico
DMP	Diâmetro médio ponderado
Ds	Densidade do solo
D _{srel}	Densidade relativa do solo
DTP	Distribuição do tamanho dos poros do solo
DWC	<i>Differential water capacity</i> , capacidade de água diferencial
e.g.	<i>Exempli gratia</i> , por exemplo
EDWC	<i>Effective differential water capacity</i> , capacidade de água diferencial efetiva
EECAC	Estação Experimental de Cana-de-açúcar de Carpina
E _i	<i>Integral energy</i> , energia integral
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPAMING	Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais
et al.	<i>Et alii</i> , e outros
etc.	Et cetera
FAO	Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação
i.e.	<i>Id est</i> , isto é
IHO	Intervalo hídrico ótimo
IPA	Instituto Agrônomo de Pernambuco
IQFS	Indicador (es) de qualidade física do solo
IQS	Indicador (es) de qualidade do solo
IWC	<i>Integral water capacity</i> , capacidade de água diferencial
LLWR	<i>Least limiting water range</i> , intervalo hídrico ótimo
NMM	Nível médio do mar

NRCS	<i>Natural Resources Conservation Service</i>
OPM	Oscilações por minuto
PC	Porcentagem de sacarose aparente na cana
pH	Potencial hidrogeniônico
PMP	Ponto de murcha permanente
PRNT	Poder relativo de neutralização total
PUI	Período de utilização industrial
QC	Quantidade de calcário
QFS	Qualidade física do solo
RP	Resistência do solo à penetração
S/A	Sociedade anônima
SAW	<i>Soil available water</i>
SAWCal	<i>Soil Available Water Calculator (Software)</i>
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SP	Sem preparo de solo
SWC	<i>Specific water capacity</i> , capacidade de água específica
TF	Terra fina
TFSA	Terra fina seca ao ar
TFSE	Terra fina seca a estufa
UFRPE	Universidade Federal Rural de Pernambuco
UNICA	União da Indústria da Cana-de-Açúcar

Lista de Símbolos

E_i	<i>Effective water capacity</i>
K_r	Condutividade hidráulica relativa
V_{anel}	Volume do anel
w_{res}	Conteúdo de água residual à base de massa no solo
w_{sat}	Conteúdo de água à base de massa no solo saturado
$\theta_{contato}$	Ângulo de contato da água com a superfície sólida
Ψ_b	Potencial total na parte de baixo do corpo de prova
Ψ_c	Potencial total na parte de cima do corpo de prova
ω_i	Função “Weighting” (restrições devidas a fatores limitantes)
®	Marca registrada
≈	Aproximadamente
A	Área da seção transversal do anel
Al	Alumínio
Al + H	Acidez potencial
b_0, b_1, b_2	Parâmetro de ajuste do modelo (Busscher, 1990)
C	<i>Differential (or specific) water capacity</i>
Ca	Cálcio
d	Parâmetro de ajuste da função potencial de K_r
F_s	Faixa seca
F_u	Faixa úmida
g	Aceleração da gravidade
h	Potencial mátrico
K	Potássio
K_{sat}	Condutividade hidráulica saturada
L	Altura do corpo de prova
L_l	Limite inferior
Li	Lítio
L_s	Limite superior
m	Parâmetro do modelo de van Genuchten (1980)
m	Saturação por alumínio
Mg	Magnésio
M_{ss}	Massa do solo seca a 105°C
n	Parâmetro do modelo de van Genuchten (1980)

N	Nitrogênio
P	Fósforo
P_{Ar}	Porosidade de aeração
P_{est}	Porosidade estrutural
P_i	Ponto de inflexão da CCRAS
P_T	Porosidade total
P_{tex}	Porosidade textural
r_c	Raio de curvatura do menisco
r_p	Raio do tubo capilar
t	Capacidade de troca catiônica efetiva
T	Capacidade de troca catiônica
T_1	Tratamento 1
T_2	Tratamento 2
T_{fluxo}	Tempo de fluxo da água pelo corpo de prova
V	Saturação por bases
V_a	Volume de água coletado
V_t	Volume total do solo
w	Conteúdo de água à base de massa
α	Parâmetro do modelo de van Genuchten (1980)
α, b	Parâmetros de ajuste do modelo de RP
α, b, c	Parâmetros de ajuste do modelo (Leão et al., 2004; 2005)
λ	Condutividade capilar
ρ	Densidade do solo
ΔP	Gradiente de pressão
θ	Umidade volumétrica
θ_{AD}	Água disponível do solo para as plantas
θ_{Ar}	Umidade volumétrica no conteúdo crítico de ar
θ_{Atual}	Conteúdo volumétrico de água atual
θ_{CC}	Umidade volumétrica na capacidade de campo
θ_{ND}	Água não disponível ou indisponível para as plantas
θ_{PMP}	Conteúdo volumétrico de água no ponto de murcha permanente
θ_r	Conteúdo volumétrico de água residual no solo
θ_{RP}	Conteúdo volumétrico de água no valor de crítico de RP
θ_s	Conteúdo volumétrico de água no solo saturado

ρ_p	Densidade de partículas
σ	Tensão superficial da água
ψ	Potencial capilar
ψ_g	Potencial gravitacional
\varnothing	Diâmetro

Lista de Figuras

- Figura 1.** Localização geográfica da área de estudo.....49
- Figura 2.** Representação do experimento em campo. Os blocos contêm duas parcelas (diferenciadas entre si pela área sombreada), com e sem preparo do solo (CP e SP).50
- Figura 3.** Detalhe da unidade experimental (parcela). A parte sombreada representa a área útil e a linha tracejada o sulco de plantio.....51
- Figura 4.** Porosidade total da camada superficial (0 – 30 cm) do ARGISSOLO AMARELO distrocoeso com e sem preparo mecanizado.....74
- Figura 5.** Distribuição do tamanho dos poros do solo na camada em estudo (0 – 30 cm) nos tratamentos SP e CP, determinados pela derivação da equação de ajuste da CCRAS.74
- Figura 6.** Condutividade hidráulica saturada da camada superficial (0 – 30 cm) do solo em estudo com e sem preparo mecanizado.76
- Figura 7.** Curva característica de retenção de água do solo, na camada superficial (0 – 30 cm), com e sem preparo mecanizado.78
- Figura 8.** Água disponível para as plantas, na camada de 0 – 30 cm, para os tratamentos CP e SP.79
- Figura 9.** Relação retenção de água – tipo de poro, na camada de 0 – 30 cm, nos tratamentos CP e SP.....80
- Figura 10.** Valores do índice H (kPa por $\Delta\theta$ g g⁻¹) na camada superficial (0 – 30 cm) do ARGISSOLO AMARELO distrocoeso com e sem preparo mecanizado.....82
- Figura 11.** Ponto de inflexão da CCRAS na camada superficial (0 – 30 cm) do ARGISSOLO AMARELO distrocoeso com e sem preparo mecanizado....83
- Figura 12.** Modelagem da variação do conteúdo de água (θ) com a densidade do solo (D_s) nos níveis críticos de θ_{CC} , θ_{PMP} , θ_{Ar} e θ_{RP} da camada superficial (0 – 30 cm) sem preparo mecanizado no ARGISSOLO AMARELO distrocoeso. A área sombreada representa o IHO.....85
- Figura 13.** Modelagem da variação do conteúdo de água (θ) com a densidade do solo (D_s) nos níveis críticos de θ_{CC} , θ_{PMP} , θ_{Ar} e θ_{RP} da camada superficial (0 – 30 cm) com preparo mecanizado no ARGISSOLO AMARELO distrocoeso. A área sombreada representa o IHO.....85

Figura 14. Variação do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) com a densidade do solo (D_s), nos tratamentos com e sem preparo mecanizado.	88
Figura 15. Densidade do solo (D_s) e densidade crítica (D_{sc}) correspondente às amostras com estrutura preservada coletadas na camada superficial (0 – 30 cm) do solo em estudo SP e CP.	89
Figura 16. Resistência do solo à penetração determinada em campo na camada superficial (0 – 30 cm), com e sem manejo mecanizado.	89
Figura 17. Curva de resistência do solo à penetração (power model) da camada superficial (0 – 30 cm), nos tratamentos SP e CP.	92
Figura 18. CCRAS (van Genuchten, 1980) e <i>Differential Water Capacity</i> ($C(h)$) da camada superficial (0 – 30 cm), nos tratamentos SP e CP.	92
Figura 19. <i>Differential water capacity</i> ($C(h)$) e <i>effective differential water capacities</i> ($E_i(h)$) na D_s média ($\approx 1,65 \text{ g cm}^{-3}$) do solo sem preparo mecanizado.	94
Figura 20. <i>Differential water capacity</i> ($C(h)$) e <i>effective differential water capacities</i> ($E_i(h)$) na D_s média ($\approx 1,63 \text{ g cm}^{-3}$) do solo com preparo mecanizado.	95
Figura 21. <i>Integral energy</i> da AD, IHO e IWC da camada superficial (0 – 30 cm) na D_s média do solo, com e sem preparo mecanizado.	98
Figura 22. Pluviometria mensal e média diária durante o ciclo de cultivo julho 2014 – novembro 2015.	99

Lista de Tabelas

Tabela 1. Características químicas do ARGISSOLO AMARELO distrocoeso utilizado no experimento (valores médios).....	53
Tabela 2. Características físicas do ARGISSOLO AMARELO distrocoeso utilizado no experimento (valores médios).....	53
Tabela 3. Atributos físicos da camada superficial (0 – 30 cm) do ARGISSOLO AMARELO distrocoeso com e sem preparo mecanizado.....	71
Tabela 4. Valores dos indicadores de qualidade física do solo para os diferentes tratamentos (SP e CP).	77
Tabela 5. Parâmetros de ajuste (coeficientes) do IHO, CCRAS e CRP para os diferentes tratamentos (SP e CP).	77
Tabela 6. Coeficientes de determinação dos modelos CRP e CRA para o IHO.	84
Tabela 7. Coeficientes de determinação dos modelos CRP e CRA para o IWC.	91
Tabela 8. Biometria e produtividade da cana-de-açúcar com e sem preparo mecanizado do solo.	100
Tabela 9. Variáveis tecnológicas da cana-de-açúcar com e sem preparo mecanizado do solo.	101

Lista de Quadros

Quadro 1. Características morfológicas e agroindustriais do cultivar RB867515.	56
Quadro 2. Especificações do penetrômetro de bancada Marconi® modelo MA933.	63
Quadro 3. Especificações do medidor automatizado de compactação do solo, marca Falker®, modelo Solo Track PLG5300.	63

Sumário

1 Introdução	23
2 Revisão de literatura	25
2.1 Agricultura e qualidade física do solo.....	25
2.2 Indicadores de qualidade física do solo e crescimento das plantas	28
2.2.1 Água disponível	33
2.2.2 Non Limiting Water Range	34
2.2.3 Least Limiting Water Range	35
2.2.4 Integral Water Capacity	37
2.2.5 Integral Energy	38
2.2.6 S-Theory.....	39
2.3 Determinação de indicadores de qualidade física do solo e crescimento das plantas em campo (in situ) e laboratório (ex situ)	42
2.4 Uso de softwares no cálculo de indicadores de qualidade física do solo e disponibilidade de água para as plantas	42
2.5 Agricultura de sequeiro no mundo.....	43
2.6 Produção de cana-de-açúcar no Brasil	43
2.6.1 Produção de cana-de-açúcar no Estado de Pernambuco - Brasil	44
3 Objetivo Geral	47
3.1 Objetivos Específicos	47
4 Material e Métodos	48
4.1 Descrição do ambiente de estudo	48
4.1.1 Área experimental: localização, clima, tipo de solo e histórico de uso.....	48
4.2 Desenho experimental: delineamento, tratamentos, caracterização do solo e operações em campo	50
4.2.1 Delineamento experimental, tratamentos e unidades experimentais	50
4.2.2 Avaliação da fertilidade, correção e adubação do solo	51
4.2.3 Operações em campo	55
4.3 Condução do experimento	56
4.3.1 Análises biométricas, produtividade e características agroindustriais da cana de açúcar.....	56
4.4 Amostragem e caracterização física do solo.....	57
4.5 Ensaio e caracterização físico-hídrica do solo.....	58
4.6 Determinação do IHO, IWC, E_i, S-index & H-index	64

4.6.1 Intervalo Hídrico Ótimo (IHO)	64
4.6.2 Integral Water Capacity (IWC).....	66
4.6.3 Integral energy (E _i)	69
4.6.4. S-index e H-index	69
4.7 Análises estatísticas	69
5 Resultados e Discussão	70
5.1 Atributos físicos do solo	70
5.1.1 Densidade do solo	70
5.1.2 Distribuição por tamanho dos agregados estáveis em água.....	72
5.1.3 Porosidade total e sua distribuição por tamanho (diâmetro)	73
5.1.4 Condutividade hidráulica saturada	75
5.2 Indicadores de qualidade física para o crescimento das plantas	76
5.2.1 Retenção e disponibilidade de água no solo para as plantas	78
5.2.2 Comportamento hardsetting (índices S e H)	81
5.2.3 Intervalo Hídrico Ótimo	84
5.2.4 Integral Water Capacity	91
5.2.5 Integral energy.....	97
5.3 Biometria, produtividade e variáveis tecnológicas da cana-de-açúcar	99
6 Considerações Finais	103
7 Conclusões	104
8 Bibliografia.....	105

1 Introdução

Historicamente, no campo da ciência relacionado à física do solo, definir com propriedade e clareza o conceito de “qualidade física do solo para o crescimento vegetal” tem inspirado as pesquisas de renomados cientistas, representando um dos maiores desafios coletivos nesta área. A complexidade provém, em grande parte, da abstração do referido conceito, bem como dos inúmeros critérios possíveis a serem levados em consideração para sua avaliação.

Para realizar a escolha destes critérios, nos últimos 30 anos a comunidade científica tem coincidido em priorizar aqueles fatores físicos do solo que afetam, de forma direta ou indireta, os processos fisiológicos das plantas. Estas ideias representam o surgimento de uma nova corrente de pensamento que procura a otimização entre estes fatores em favor da produtividade agrícola.

Nesta corrente de pensamento, a umidade do solo ocupa um lugar em destaque e representa uma variável-chave em distintos indicadores para a avaliação da qualidade física do solo na agricultura.

Ao considerar novos critérios de avaliação, torna-se necessário reavaliar práticas de manejo agrícolas, usualmente, utilizadas em setores produtivos de grande importância como o sucroenergético, no qual o Brasil assume a liderança na produção mundial.

Sendo o Estado de Pernambuco uma das 10 principais regiões canavieiras deste país, é claro que esta nova geração de indicadores deve ser incorporada para avaliação de práticas como o preparo mecanizado do solo.

No Nordeste do Brasil, onde se localiza Pernambuco, o preparo mecanizado do solo é utilizado, entre outros propósitos, como alternativa para atenuar (provisoriamente) o caráter coeso de uma importante fração de solos cultivados com cana-de-açúcar.

Nesta região, embora estudos prévios tenham sido realizados, abordagens contemporâneas como o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO), Integral Water Capacity (IWC), Integral energy (E_i), Índice S e H ainda são escassas.

Desde o ponto de vista agrônomo, a aplicação dos índices supracitados torna-se ainda mais relevante no cultivo de cana-de-açúcar em regime de

sequeiro, pois ajudam a entender melhor o comportamento do solo em diferentes umidades, uma vez que esta situação varia, principalmente, em função das condições climáticas prevalentes ao longo do ciclo de cultivo.

Como mencionado anteriormente, o preparo mecanizado do solo visa melhorar as condições edáficas para a produção agrícola. Portanto, espera-se que promova, de maneira indireta, o crescimento e desenvolvimento do sistema radicular e, por conseguinte, da cana-de-açúcar. Assim, é interessante complementar a avaliação deste sistema de produção verificando sua influência no potencial de resposta desta cultura.

Neste contexto, a presente pesquisa objetivou avaliar a influência do preparo mecanizado na qualidade física do solo e no potencial de resposta da cana-de-açúcar submetida a regime de sequeiro no Estado de Pernambuco, Brasil.

Neste documento, é apresentada uma revisão de literatura com intuito de expor de forma breve os fundamentos teóricos que sustentam a presente investigação.

2 Revisão de literatura

2.1 Agricultura e qualidade física do solo

A agricultura é um dos componentes essenciais na história social da humanidade e seus desafios (Mazoyer & Roudart, 2010). O solo, entre outras funções, sustenta a produção agrícola (Kibblewhite, Ritz, & Swift, 2008). Não obstante, em seu estado natural, é pouco comum que proporcione condições físicas favoráveis para o crescimento das culturas (Gardner, Laryea, & Unger, 1999).

Embora a importância das propriedades físicas do solo tenha sido reconhecida desde os inícios da agricultura, como evidenciado, entre outros fatos, pela ancestral utilização de instrumentos de lavoura (Hillel, 2006), é comumente aceito que seu estudo científico teve origem nos princípios do século XIX, no continente Europeu. A partir de então, um número considerável de investigações tem objetivado estudar atributos e processos físicos do solo (i.e., propriedades), assim como sua relação com o crescimento das plantas (Duiker & Fritton, 2009).

Segundo Carter et al. (1997), o desafio consiste em identificar as propriedades que refletem a capacidade do solo de gerar e sustentar o crescimento das plantas (i.e., atributos de qualidade do solo). Em outras palavras, o propósito dos estudos sobre qualidade do solo é verificar, sempre que possível, vínculos entre propriedades e funções específicas. Assim, entre outras vantagens, podem ser concebidas informações sobre valores críticos (dos atributos) associados às alterações de determinada função (e.g., produtividade agrícola).

Seguindo esta linha de pensamento, é claro que “qualidade” se refere à capacidade do solo para realizar funções específicas (Lal & Shukla, 2004). Por conseguinte, avanços científicos, tecnológicos e conceituais têm resultado numa aproximação concernente à caracterização do solo em função de sua qualidade; ou como descrito por Doran (2002), a partir de sua capacidade para sustentação da produtividade, preservação da qualidade ambiental, e promoção da saúde vegetal e animal.

Recentemente, com a preocupação de apurar as definições anteriores e melhor adequá-las ao campo da ciência relacionado à física do solo, os cientistas de Jong van Lier & Gubiani (2015) apontaram que o conceito de “qualidade” é subjetivo, uma vez que não possui dimensões (i.e., grandezas) e, portanto, tampouco uma definição absoluta, o que de fato discrepa perante as definições objetivas neste campo da ciência.

Estes autores, ainda explicam que a subjetividade inerente ao conceito “qualidade física do solo” desde o ponto de vista agrícola, pode ser traduzido objetivamente para a área da física do solo em propriedades de transferência e armazenamento de massa e energia correspondentes a conteúdos de água, solutos, ar (fluxo de gases) e calor. Complementarmente, especificam que estes conteúdos deverão ser apropriados para maximizar o desenvolvimento das culturas, além de minimizar a degradação ambiental, garantir a estabilidade estrutural do solo para manter sua saúde biológica e permitir o crescimento das raízes.

Contudo, em textos como o de Topp et al. (1997) já se consideravam tais conceitos. No mesmo, os autores comentam que a qualidade física do solo, deriva principalmente das partículas primárias (e.g., fragmentos minerais) e secundárias (e.g., agregados), bem como dos espaços entre elas (e.g., porosidade). Portanto, a caracterização física do solo dá-se basicamente pelo estudo do tamanho (granulometria) e arranjo (estrutura) de suas partículas sólidas minerais (Ferreira, 2010).

Topp et al. (1997) ainda explicam que a granulometria e a estrutura conferem ao solo dois atributos fundamentais: capacitância e resistência — ambos citados implicitamente por de Jong van Lier & Gubiani (2015). A capacitância, refere-se à sua capacidade de armazenamento e transmissão de massa e energia; e a resistência, à habilidade de preservação da sua estrutura (principalmente, ante práticas de manejo, penetração do sistema radicular e fauna do solo).

Por outro lado, nas ideias expostas por de Jong van Lier & Gubiani (2015) também pode-se perceber uma certa semelhança com o pensamento expresso pelo destacado físico do solo estadunidense John Letey (1933 – 2014).

Com uma visão progressista, Letey (1985) expôs a necessidade de identificar pontualmente os constituintes de uma boa qualidade física do solo.

Este posicionamento teve a intenção de deixar de lado respostas gerais, as quais considerou nem sempre aceitáveis e, frequentemente, pouco úteis.

Fundamentado em pesquisas prévias, Letey (1985) explicou que é preciso distinguir entre os fatores físicos que afetam direta (i.e., processos fisiológicos) e indiretamente (i.e., que modificam os fatores que atuam sobre processos fisiológicos) o crescimento das plantas, estudar suas inter-relações, bem como a relação destes com o manejo.

Deste modo, o tipo de manejo a ser implementado deve versar em função das propriedades físicas do solo a serem modificadas. Assim, esforços pontuais podem ser realizados para contribuir ao enriquecimento daquilo que, previamente, foi definido como qualidade física do solo (Letey, 1985).

Cabe mencionar que a afirmação anterior fica sujeita à viabilidade dos processos exigidos para tais fins, visto que, de acordo com Carter et al. (1997) o solo possui propriedades: i) intrínsecas — também chamadas de inerentes —, que são permanentes ou difíceis de mudar (e.g., granulometria); e ii) dinâmicas, que são influenciadas pelo uso ou manejo (e.g., porosidade).

Certamente, orientar esforços com o intuito de aprimorar a qualidade do solo tem representado uma tarefa difícil. Sobre o tema, Topp et al. (1997) explicam que os atributos físicos do solo interagem de maneira complexa, assim, enquanto uma propriedade é melhorada, simultaneamente, outras podem ser afetadas de maneira negativa. Por conseguinte, estabelecer uma boa qualidade física do solo, a partir de práticas de manejo, envolve uma cuidadosa otimização de atributos.

Dexter (2004a) destaca que para a identificação de práticas de manejo sustentáveis, considera-se importante estimar (periodicamente) o grau de degradação ou melhoramento do solo.

Uma possibilidade para a determinação da qualidade física do solo decorre da avaliação de suas propriedades (ou atributos). Não obstante, frequentemente, a medição direta de determinadas propriedades do solo é complexa. Por este motivo, na prática são utilizados tanto indicadores de qualidade física quanto funções de pedotransferência, como alternativa indireta para realizar a avaliação do (s) atributo (s). De forma conveniente, os indicadores têm a capacidade de representar um ou vários atributos do solo (Carter et al., 1997).

De maneira oportuna, Carter et al. (1997) mencionam que, ocasionalmente, os indicadores apresentam baixa correlação com a produtividade das culturas (e.g., densidade do solo). Não obstante, influenciam outros atributos do solo que individual ou coletivamente apresentam um efeito notavelmente maior (e.g., difusão de oxigênio).

Isto posto, torna-se evidente a necessidade de integrar vários parâmetros para a obtenção de indicadores de qualidade com melhor nível, ou seja, capazes de refletir as interações sinérgicas entre o solo, as práticas agrícolas, o crescimento das plantas e o clima (Topp et al., 1997).

Acompanhando este raciocínio, solos classificados como de baixa qualidade física são aqueles que precisam de um manejo meticuloso para manter condições adequadas, isto é, em favor da produção agrícola (Letey, 1985).

2.2 Indicadores de qualidade física do solo e crescimento das plantas

Desde o ponto de vista de Letey (1985), há uma diferente expectativa sobre o potencial produtivo de cada solo em função de suas propriedades físicas. Neste sentido, estudos como o realizado por da Silva et al. (1994) sublinham a necessidade de caracterizar, a partir de um mínimo de parâmetros, os efeitos do manejo nas propriedades físicas do solo, particularmente, naquelas que limitam o crescimento das plantas.

Kirkham (2014) cita as contribuições realizadas por Shaw (1952) e Kirkham (1973) para afirmar que (pelo menos) quatro são os fatores físicos do solo que afetam (de forma direta) o crescimento das plantas: teor de água (umidade, θ), resistência do solo à penetração das raízes (RP), temperatura e aeração (fluxo de gases). Ao mesmo tempo, enfatiza que dentre eles, a água é o mais restritivo e, portanto, o de maior importância.

Inclusive, Letey (1985) considera a água do solo um fator de controle dominante e uma variável-chave, pois como bem explicam Asgarzadeh et al. (2014), seu teor (θ) não apenas possui influência sobre o ambiente físico do sistema radicular das plantas, mas também nas condições químicas e biológicas do solo. Motivo pelo qual, seu manejo resulta essencial em sistemas agrícolas.

Neste sentido, o físico Leyman J. Briggs (1874 – 1963) realizou significantes contribuições em relação ao entendimento das interações solo – água e, posteriormente, solo – água – planta (Landa & Nimmo, 2003).

Entre seus aportes, encontram-se assuntos relacionados à retenção e movimentação de água no solo (Briggs, 1897), a conceptualização e determinação dos equivalentes de umidade (Briggs & McLane, 1907), assim como do coeficiente de murcha (Briggs & Shantz, 1912).

Briggs foi contratado pelo “Bureau of Soils” (Divisão de Solos) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), em 1896 (Landa & Nimmo, 2003). Um ano depois, a partir da recomendação de Milton Whitney (Chefe de Divisão), foi publicada a monografia intitulada “*The mechanics of soil moisture*” no boletim N° 10 da USDA (Briggs, 1897). Neste importante documento, a intenção de Briggs foi apresentar a aplicação de alguns “princípios dinâmicos” às questões relacionadas ao movimento e retenção de água no solo.

Destacam-se, a explicação detalhada (mas ainda não aperfeiçoada) sobre a causa do movimento capilar da água no solo, bem como a ampliação de informações (para aquela época) sobre os princípios e as leis que regem este processo; além disso, a conceitual partição da água contida no solo, em três tipos: água gravitacional, capilar e higroscópica.

Assim, Briggs (1897) considerou como gravitacional a fração de água que excede a quantidade que o solo é capaz de reter e, conseqüentemente, livre para drenar — isto, em função das condições prevalecentes, visto que, por definição não é uma propriedade intrínseca do solo, mas dinâmica.

Como água capilar, classificou a fração que pode ser retida pelo solo e possui a capacidade para se movimentar devido à ação das forças capilares — sobre as condições supracitadas e por motivos semelhantes.

E finalmente, a água higroscópica, a qual considerou como aquela que se encontra adsorvida à superfície das partículas do solo e, diferentemente das frações anteriores, não possui a capacidade para se movimentar devido a ação das forças capilares ou gravitacionais.

Nesta abordagem, a máxima quantidade de água que um solo poderia reter, dependeria do efeito resultante de duas forças: a gravitacional e a tensão superficial (Briggs, 1897).

Não obstante, aproximadamente uma década depois, o célebre físico Edgar Buckingham (1867 – 1940), contemporâneo de Briggs, e também vinculado à Divisão de Solos da USDA, com uma abordagem notadamente ligada ao rigor matemático, realizou a publicação do documento “*Studies on the Movement of Soil Moisture*” no boletim N° 38 da USDA (Buckingham, 1907). Neste relevante estudo, o autor apresenta as ideias básicas que explicam o fluxo da água no solo, e sobre as quais, se fundamenta a teoria moderna sobre este tema (Gardner, 1986; Landa & Nimmo, 2003).

Entre as ideias expostas, a introdução do conceito “potencial capilar” (ψ), também conhecido como “potencial mátrico” (h) — abrangendo sua definição, determinação, assim como a projeção e ponderação das curvas (ψ , θ) em diferentes tipos de solo —, associado às conseguintes considerações sobre a “condutividade capilar” (λ) e o “fluxo capilar da água”, representaram um dos maiores avanços em relação à determinação do fluxo da água no solo (Buckingham, 1907; Landa & Nimmo, 2003).

Buckingham (1907) reconheceu que a quantidade de “água capilar” depende, em certo grau, da temperatura e dos solutos (solo \rightarrow água). No entanto, considerou como principais fatores: a profundidade do solo ao nível de livre drenagem, bem como sua textura e estrutura. Além do mais, afirmou que o solo exerce uma atração (ψ) suficiente para reter água (θ) contra a ação da gravidade (ψ_g), que tende a drená-lo perfeitamente até secá-lo. Esta atração depende da quantidade de água no solo: logo $\psi = \psi(\theta)$ e então, $\lambda = f(\theta)$.

Devido a esta atração solo – água (ψ), o autor explica que para remover — apenas por meios mecânicos — uma determinada fração de água de um solo úmido é necessário realizar uma quantidade específica de trabalho. Assim, o trabalho requerido por unidade de massa (e.g., centigrama) para remover uma determinada quantidade de água da matriz do solo, é o que ele definiu como “potencial capilar” (Buckingham, 1907).

O mesmo autor, afirmou que o potencial capilar varia para cada tipo de solo; do mesmo modo, a capacidade do solo para reter água é diferente para distintos tipos de solo, ou inclusive, para o mesmo tipo de solo em diferente estado estrutural. Situação que também elucidou da seguinte maneira: diferentes tipos de solo submetidos à mesma força (e.g., gravitacional ou outra) com

tendência a retirar água deles, drenam e, portanto, secam uns mais do que outros. Contudo, o valor final do potencial capilar deve ser o mesmo para todos, pois estariam “equilibrados” sob a mesma força. Assim, solos que perdem água sob baixas pressões — ou outra (s) força (s) —, são solos vinculados a uma menor capacidade de retenção e vice-versa (Buckingham, 1907).

Sem tirar o mérito de Buckingham (1907), Libardi (2005) cita o trabalho realizado por Corey e Klute (1985), autores que levantaram algumas falhas e contradições a respeito deste pioneiro trabalho do início do século XX.

Neste mesmo ano, Briggs & McLane (1907) desenvolveram um método para determinar o que chamaram de “*moisture equivalent*” (equivalente de umidade), e que exemplificaram equilibrando o teor de água de diferentes tipos de solo utilizando a força gerada a partir de uma centrifuga, neste caso, proporcional a $3000 \times g$ (g = a aceleração da gravidade) e $1000 \times g$ em estudos posteriores (Briggs & Shantz 1912). Este conceito seria o precursor da ideia amplamente conhecida como “capacidade de campo” (Veihmeyer & Hendrickson, 1927, 1931; Landa & Nimmo, 2003; Kirkham, 2005).

Para elucidar o conceito de “equivalente de umidade”, os autores explicam que, refere-se à máxima porcentagem de umidade que um determinado tipo de solo pode reter quando equilibrado com uma força definida. Em outras palavras, os equivalentes de umidade para um conjunto de solos, representam o teor de água no qual seria igualmente “difícil” remover uma quantidade adicional da mesma a partir de qualquer um deles. Neste panorama, a determinação dos “equivalentes de umidade” torna-se especialmente importante na comparação entre teores de água em diferentes tipos de solo sob cultivo (Briggs & McLane, 1907).

Após Briggs deixar seu cargo no “Bureau of soils” da USDA, ingressou ao “Bureau of Plant Industry” (“Divisão de Fitotecnia”) deste mesmo órgão. Neste Bureau, em coautoria com o botânico Homer L. Shantz (1876 – 1958) realizou diversas pesquisas sobre os requerimentos hídricos das plantas, com experimentos conduzidos entre 1910 – 1916 (Landa & Nimmo, 2003).

Entre os vários produtos desta parceria, encontram-se duas publicações nas quais foram apresentadas metodologias para a determinação direta e indireta do limite inferior do que denominaram como a faixa de “água disponível no solo”. Este conceito contribuiu substancialmente para o entendimento da

relação entre a umidade do solo e o crescimento das plantas e, em consequência, para a agricultura (Briggs & Shantz, 1911, 1912).

Briggs & Shantz (1911) trabalharam com diversas plantas e tipos de solo, visando a determinação do conteúdo de água no solo em que as plantas murchavam. Com base em suas apreciações, expuseram que em todos os solos sobre os quais a cobertura vegetal apresentou murcha por causa da escassez de água, ainda continham umidade, variando seu percentual entre 1 e 25 em função das diferentes classes texturais. Cabe mencionar que as menores porcentagens de umidade no solo corresponderam aqueles com granulometrias mais grosseiras (i.e., areias quartzosas) e vice-versa.

De forma geral, reiteraram a importância do estudo das relações entre a umidade do solo e o crescimento das plantas, pois identificaram com nitidez que o simples teor de água do solo, qualquer que seja, não indicaria e nem representaria fielmente a quantidade de água que se encontra disponível para as plantas (Briggs & Shantz, 1911).

Neste contexto, os autores explicaram que para determinar a quantidade de água disponível no solo (θ_{AD}), seria necessário determinar dois parâmetros: i) a umidade atual do solo (θ_{Atual}); e ii) a mínima na qual as plantas seriam capazes de absorvê-la, portanto, chamada de “água não disponível ou indisponível” (θ_{ND}).

Assim, a diferença entre estes dois parâmetros, indicaria a quantidade de água efetivamente disponível para as plantas; logo, $\theta_{AD} = (\theta_{Atual}) - (\theta_{ND})$.

Esclarecendo que, para a determinação da quantidade de água “não disponível”, a murcha permanente das plantas foi utilizada como critério de indisponibilidade (Briggs & Shantz, 1911).

Como mencionado anteriormente, Briggs & Shantz (1912) descreveram o método para determinar indiretamente o “*wilting coefficient*” (coeficiente de murcha), definido como a porcentagem de água no solo na qual as plantas murcham e não se recuperam numa atmosfera saturada, caso não seja adicionada água.

Neste estudo, encontram-se as equações para determinar o coeficiente de murcha a partir do “*moisture equivalent*” (equivalente de umidade), “*moisture*

holding capacity” (capacidade de retenção de umidade do solo contra a força de gravidade), bem como da composição granulométrica do solo (Gardner, 1986).

Aproximadamente duas décadas depois, o físico Lorenzo A. Richards (1904 – 1993), reconhecido por Gardner (1972) como uma das mentes mais influentes do século XX na área da física do solo, consolidou os esforços desta prévia geração de físicos devido à formulação de uma teoria geral do movimento da água em solo não saturado (Richards, 1928, 1931; Raats, 2001).

A partir da concepção destes fundamentos teóricos, diferentes abordagens têm sido propostas para a quantificação da disponibilidade de água no solo (θ_{AD}). Minasny & McBratney (2003), apud Richards & Wadleigh (1952), definiram θ_{AD} como a faixa de água que pode ser armazenada no solo e disponível para as culturas.

2.2.1 Água disponível

Frank J. Veihmeyer (1886 – 1977) em coparticipação com Arthur H. Hendrickson (1890 – 1968) realizou extensos estudos no tocante à condição da água no solo e ao crescimento das plantas (Veihmeyer & Hendrickson, 1927). Entre seus aportes, encontra-se uma alternativa para determinar o teor de água disponível (Veihmeyer & Hendrickson 1931, 1949).

Neste sentido, Kirkham (2014) explica que o conceito de água disponível (θ_{AD}) proposto por Veihmeyer & Hendrickson (1927) pode ser definido como a diferença entre a umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) e aquela no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}); logo, $\theta_{AD} = \theta_{CC} - \theta_{PMP}$.

Diferentemente da θ_{PMP} — claramente conceituada (Briggs & Shantz, 1911) —, a θ_{CC} não foi rigorosamente definida, mas pode ser entendida como a porcentagem de água (*in situ*) que permanece num solo (úmido ou próximo da saturação) após livre drenagem. Conseqüentemente, o valor é particular para cada tipo de solo.

Alguns trabalhos mostram a relação entre a θ_{PMP} e a tensão equilibrada a 1.500 kPa (Richards & Weaver, 1944), bem como a da θ_{CC} e as tensões equilibradas a 10 kPa e a 33 kPa para solos de textura arenosa e argilosa, respetivamente (Haise et al., 1955).

A simplicidade deste modelo conceitual, embora baseado em limites arbitrários, ajudou a popularizá-lo entre aqueles que atuam no campo do manejo de irrigação (Hillel, 1998).

Sem embargo, Asgarzadeh et al. (2011) explicam que a abordagem de θ_{AD} proposta por Veihmeyer & Hendrickson (1927, 1931, 1949), descreve, segundo Kirkham (2005), o conteúdo de água entre a θ_{CC} e a θ_{PMP} , como sendo total e igualmente disponível para as plantas. Embora em alguns casos isto seja verdade, na maioria das culturas, a produtividade diminui à medida que o conteúdo de água no solo se aproxima da θ_{PMP} (Kirkham, 2014).

2.2.2 Non Limiting Water Range

As considerações apresentadas por Letey (1985) levaram a outro nível conceitual o entendimento da relação entre o teor de água no solo e o crescimento das plantas.

O autor explica que a disponibilidade de água (θ_{AD}) *per se*, poderia não indicar o teor adequado (ou menos restritivo) para o crescimento das plantas. Por conseguinte, conceituou o “*Non-Limiting Water Range*” (conteúdo de água não limitante, NLWR), o qual, além de considerar os limites da umidade na capacidade de campo (CC) e no ponto de murcha permanente (PMP), ainda é afetado (ampliado ou reduzido) por mais duas restrições: porosidade de aeração (P_{Ar}) e resistência do solo à penetração de raízes (RP).

Empregando este critério, Letey (1985) agrupou três dos quatro fatores físicos do solo relacionados ao crescimento das plantas em um só indicador. Assim, o NLWR descreve uma faixa de água limitada pelos teores de água a partir dos quais o crescimento das plantas poderia cessar ou ser drasticamente reduzido.

Conceitualmente, o limite superior (L_S) do NLWR é representado pelo menor valor entre a θ_{Ar} e a θ_{CC} . De maneira oposta, o limite inferior (L_I) corresponde ao maior valor entre a θ_{PMP} e a θ_{RP} ; logo, $NLWR = L_S - L_I$.

2.2.3 Least Limiting Water Range

Entre os pesquisadores que aprimoraram este enfoque encontram-se da Silva et al. (1994), uma vez que estenderam o conceito do NLWR visando a avaliação da faixa de água definida por quatro teores-limite como índice de qualidade estrutural do solo para o crescimento das plantas, denominando-o “*Least Limiting Water Range*” (conteúdo de água menos limitante, LLWR).

Em seu estudo, os autores consideraram pouco apropriada a utilização do termo NLWR, pois admitem que o crescimento das plantas varia de forma contínua com os fatores limitantes (i.e., h , P_{Ar} , RP), ao invés de seguir uma função descontínua (i.e., “*step function*”). Explicam ainda que o crescimento das plantas deve ser considerado apenas “menos limitado” dentro da faixa do NLWR e “mais limitado” fora desta. Em consequência, preferiram chamá-lo de LLWR.

Concomitantemente, avaliaram o LLWR como indicador de qualidade estrutural do solo para a produção de culturas. Para este fim, objetivaram: i) quantificar o LLWR a partir de dados experimentais e de valores limitantes de h , P_{Ar} e RP reportados na literatura; e ii) avaliar a sensibilidade deste parâmetro em função da densidade do solo (D_s) e a densidade relativa do solo (D_{srel}), bem como determinar os valores limitantes de θ_{CC} , θ_{PMP} , θ_{Ar} e θ_{RP} em solos de textura contrastante.

Para estabelecer os valores críticos e posteriormente associá-los à umidade (θ), da Silva et al. (1994) basearam-se nos trabalhos de distintos pesquisadores, assim: $\theta_{FC} = - 0,01$ MPa (Haise et al., 1955); $\theta_{PMP} = - 1,5$ MPa (Richards & Weaver, 1944); $\theta_{RP} = 2$ MPa (Taylor et al., 1966); e $\theta_{Ar} = 10\%$ (Grable & Siemer, 1968). Logo, $NLWR = \text{Mín}(\theta_{FC}; \theta_{Ar}) - \text{Máx}(\theta_{RP}; \theta_{PMP})$.

O maior valor ocorre quando o $LLWR = \theta_{CC} - \theta_{PMP}$, então $LLWR = \theta_{AD}$. Em contrapartida, o menor valor corresponde a $LLWR = L_S - L_I = 0$, neste ponto a D_s é definida como D_s crítica (D_{sc}).

Entre outras coisas, os autores concluíram ainda que o LLWR é um parâmetro com maior sensibilidade a mudanças estruturais (caracterizadas pela D_s) do que a θ_{AD} . Assim, afirmaram que o LLWR pode ser utilizado como indicador de qualidade estrutural do solo para o crescimento das culturas. Entretanto, advertiram que sua utilidade está condicionada à capacidade de

relacionar a resposta das culturas aos valores críticos (h , P_{ar} e RP), bem como à redução do tempo para determiná-lo a partir da utilização de funções de pedotransferência.

Cabe mencionar que, o LLWR é principalmente afetado pela granulometria, o incremento (ou diminuição) da D_s , assim como pelo conteúdo de carbono orgânico (da Silva, et al., 2006).

Outros pesquisadores também se basearam no NLWR (Letey, 1985) para avaliar a qualidade física do solo, entre eles: Topp et al. (1994) e Cass et al. (1994). Posteriormente, de Orellana et al. (1997) chamaram-no de “*Optimal Hydric Interval*” (Intervalo Hídrico Ótimo, IHO) ou “*Intervalo Hídrico Ótimo*” em espanhol (de Orellana & Pillati, 1993; Pillati et al., 2012), conceito também adotado por Tormena et al. (1998) para se referir em português ao LLWR (Silva et al., 1994).

Tanto os valores dos limites quanto os métodos para determiná-los diferem entre pesquisadores. Pillati et al. (2012) sugerem a atualização e padronização dos mesmos, pois resulta difícil ou impossível a comparação entre trabalhos de distintos autores.

Contudo, a partir da quantificação deste parâmetro, um número considerável de pesquisas tem-no caracterizado e avaliado para determinar a influência de diversos sistemas de manejo e alguns atributos na qualidade do solo, bem como a sua relação com o crescimento das culturas (Tormena et al., 1999; Guedes Filho, et al., 2013; Wilson et al., 2013; Chen et al., 2014; Safadoust et al., 2014; Mishra et al., 2015; Cecagno et al., 2016).

Certamente, o LLWR tem sido alvo de crítica pela comunidade científica. Gubiani et al. (2013) indicam que a eficiência do IHO para prever o crescimento das plantas ainda não foi devidamente provada. Comentam que além do refinamento de seus limites, novos índices precisam ser desenvolvidos, com capacidade de integrar a variação dos fatores físicos do solo ao longo do ciclo de crescimento das plantas, determinados por fatores meteorológicos.

Posteriormente, no documento apresentado por de Jong van Lier & Gubiani (2015), entre outras coisas, foram apontadas incoerências na sua definição e cálculo, como também foi discutida sua interpretação tanto como indicador da produtividade das culturas, quanto da qualidade física do solo (QFS). Ainda foram questionados os valores de D_{sc} encontrados pelo método

comumente empregado (padrão). Além de tudo, os autores atribuíram sua popularidade à simplicidade com que é tratado (pelo menos no Brasil) e não à sua eficácia, pois afirmaram que esta última não tem sido demonstrada.

2.2.4 Integral Water Capacity

Groenevelt et al. (2001) introduziram o “*Integral Water Capacity*” (Capacidade de Água Integral, IWC) como um método flexível que permite a consideração e quantificação de várias limitações físicas ao calcular a água disponível em solos expansivos ou não expansivos. Não obstante, consideram-se distintos procedimentos, restrições e funções para cada caso, pois para solos expansivos é necessário aplicar a teoria apresentada por Groenevelt & Bolt (1972) que permite incluir o potencial “*overburden*”.

O método consiste em aplicar funções contínuas “*weighting*”, que representem restrições físicas e/ou fisiológicas na água disponível do solo — pois o conceito de θ_{AD} envolve capacidades tanto do solo quanto da planta —, às faixas úmida e seca da “*differential water capacity*” (capacidade de água diferencial) também conhecida como “*specific water capacity*” (capacidade de água específica) e, posteriormente, realizar sua integração. Em decorrência deste processo, gera-se a “*effective differential water capacity*” (capacidade de água diferencial efetiva), representando o conteúdo de água disponível, que os autores chamam de IWC para enfatizar a capacidade do solo de atuar como “capacitor de água”.

Os autores comentam que esta abordagem é flexível o suficiente para levar em consideração peculiaridades das propriedades físicas do solo e o comportamento das culturas perto dos limites da θ_{AD} , pois seus limites não são rígidos como os considerados em outros parâmetros (e.g., LLWR e θ_{AD}), mas graduais.

Para exemplificar, comentam que na faixa úmida do IWC pelo menos duas restrições são as causas de a água do solo não ser totalmente disponibilizada para as plantas: i) rápida drenagem, caso a condutividade hidráulica seja elevada em altos conteúdos de água; e ii) falta de oxigênio, caso a condição fosse contrária.

A medida que o solo vai secando, estas restrições deixam de ser importantes, dando passo a outras próprias da faixa seca: i) baixa condutividade hidráulica; e ii) baixa penetração de raízes no solo.

Posteriormente, Groenvelt et al. (2004) apresentaram a função para considerar o efeito do potencial osmótico em solos salinos.

Groenevelt et al. (2001) ainda sugerem que a elaboração, ajuste e refinamento das funções pode ser feita por especialistas em diversas áreas, por exemplo: fisiologia vegetal e relação solo – planta.

Neste contexto, os autores propõem a substituição do uso da θ_{AD} , pelo conceito de IWC. Além disso, Asgarzadeh et al. (2010) comentam que pela sua correlação com o LLWR e o índice S é, potencialmente, um útil indicador de QFS.

2.2.5 Integral Energy

Richards (1928) expõe que o conceito de “disponibilidade” envolve duas ideias: i) a habilidade do sistema radicular da planta para absorver e utilizar a água com a qual está em contato; e ii) a velocidade com que a água do solo se movimenta para restituir aquela que foi utilizada pela planta.

Nesta perspectiva, Minasny & McBratney (2003) explicam que o primeiro ponto, denota a necessidade de caracterizar o trabalho requerido pela planta para remover a água a partir do solo; já o segundo, indica o papel da condutividade hidráulica não saturada.

Baseados nesta e em algumas outras considerações, justificam a utilidade de um índice que quantifique a energia requerida para remover uma determinada quantidade de água a partir do solo, pois a definição de Veihmeyer & Hendrickson (1927, 1931, 1949), além de ser uma medida estática, não descreve pontualmente tal requerimento.

Para exemplificar esta afirmação, Minasny & McBratney (2003) comentam que é preciso considerar o “caminho” (i.e., a forma) ao longo da “curva característica de retenção de água no solo” (CCRAS) — determinado pela distribuição de seus poros —, pois diferentes tipos de solo podem reter quantidades semelhantes de água (e.g., $\theta = 0,40 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) dentro de um

determinado intervalo de potenciais (e.g., entre -10 e -1.500 kPa), porém, o custo energético para obtê-la pode ser distinto.

Neste contexto, os referidos autores apresentaram um “novo” conceito chamado de “Integral Energy” (energia integral, E_i), como uma tentativa de quantificar a energia requerida (pelas plantas) para remover uma unidade de água a partir do solo ($J\ kg^{-1}$) e, providenciar valiosas informações sobre a disponibilidade de água no solo. Este parâmetro pode ser aplicado a qualquer função ou modelo que ajuste a CCRAS, como por exemplo, o proposto por van Genuchten (1980).

Em virtude de sua aplicabilidade, o E_i foi determinado por Asgarzadeh et al. (2011) em indicadores mais sofisticados como o LLWR (da Silva et al., 1994) e o IWC (Groenevelt et al., 2001) para melhor caracterizar a disponibilidade de água para as plantas e, portanto, a qualidade física do solo.

2.2.6 S-Theory

Dexter em 2004, mediante uma série integrada por três documentos, apresenta o que chamou de “*S-theory*” (teoria S). Esta teoria que consiste no uso do “*S-index*” (índice S) para a predição de um conjunto de propriedades físicas do solo (Dexter, 2004abc).

No primeiro documento desta série, de forma geral, o autor vincula alguns “sintomas” mostrados em solos de baixa qualidade (e.g., caráter coeso) a uma causa comum: sua pobreza estrutural. Assim, parte da lógica por trás da teoria S pode ser resumida da seguinte forma: a maior parte das propriedades físicas e comportamento do solo são governadas pela estrutura do solo, a qual é refletida na distribuição do tamanho de poros (Dexter & Czyż, 2007).

Para avaliar esta condição, o autor introduziu o índice S como um indicador de qualidade do solo (IQS) de “fácil determinação”, que permite a comparação direta entre diferentes tipos de solo e os efeitos de distintos sistemas de manejo. Além disso, discute como este índice é afetado por algumas propriedades físicas do solo (e.g. textura, D_s e matéria orgânica) e sua relação com o crescimento do sistema radicular das plantas (Dexter, 2004a).

Dexter (2004abc) define o índice S como a inclinação da CCRAS (representada graficamente como θ , $\log_e h$) no ponto de inflexão; logo $S =$

$d\theta/d(\ln h)$. O valor do S indica em que grau a porosidade do solo está concentrada numa faixa estreita de tamanho de poro. Assim, uma inclinação pequena indicará um solo sem estrutura (homogêneo), e vice-versa.

Para colocar esta situação em contexto, o autor explica que a porosidade do solo (P_T) pode ser considerada “composta” por duas partes: i) a porosidade textural (P_{tex}), com ocorrência entre partículas primárias; e ii) a porosidade estrutural (P_{est}), compreendendo poros biológicos, microfissuras, fissuras, bem como macro e microestruturas. A primeira, permanece pouco afetada pelas práticas de manejo. Em contraste, a porosidade estrutural resulta sensível ao manejo mecanizado, compactação e colheita (Dexter, 2004a).

Numa primeira aproximação, este autor considera como estruturais os poros drenados entre o solo saturado e o ponto de inflexão da CCRAS. Por conseguinte, abaixo deste ponto drenam principalmente poros texturais — conceito que Dexter sustenta ao citar os resultados do estudo efetuado por Richard et al. (2001).

Assim, o autor estabelece e propõe a seguinte tese: “uma maior inclinação da CCRAS no ponto de inflexão, deve-se principalmente à porosidade microestrutural e, portanto, o S governa diretamente várias das principais propriedades físicas do solo”. De tal modo, valores elevados de S correspondem a uma maior presença de poros estruturais relacionando-os a solos de boa qualidade, e vice-versa.

Como referência, Dexter (2004abc) e Dexter & Czyż (2007) baseados tanto na experiência (prática) quanto na evidência apresentada em seus estudos (com solos da Austrália, Inglaterra, Polônia, Espanha, Suécia, Holanda e USA), sugerem as seguintes categorias de valor S para a caracterização da qualidade estrutural do solo: muito boa $S \geq 0,050$; boa $0,050 > S \geq 0,035$; pobre $0,020 > S < 0,035$; e muito pobre $S < 0,020$. Estes valores também são citados por Dexter & Richard (2009).

O índice S também foi utilizado por Tormena et al. (2008) em condições tropicais, no Brasil. Estes autores apontaram a necessidade de realizar estudos em diferentes tipos de solo e sistemas de manejo para melhor avaliar e determinar o S como IQS.

Em contraposição, de Jong van Lier (2014) defende a hipótese de que as correlações entre o índice S e a porosidade, D_s e $D_{s_{\text{rel}}}$ são inerentes à definição

do S, tornando desnecessárias as investigações empíricas. Explica que estas propriedades do solo contêm a mesma informação sobre sua qualidade; porém sua determinação resulta muito mais simples, motivo pelo qual desqualifica ao índice S como um IQS interessante. Além disso, comenta que o S é um parâmetro estático, portanto, incapaz de descrever processos dinâmicos, entre outras coisas.

De forma similar, Naderi-Boldaji & Keller (2016) comentam que, embora seus resultados tenham mostrado uma forte correlação (com possíveis desvios em alguns solos) entre o grau de compactação do solo e o $\ln(1/S)$ — o que outorga suporte ao índice S como IQS —, o grau de compactação também pode ser utilizado como IQS e sua determinação também resulta mais simples.

No segundo documento da série de Dexter mencionada anteriormente, o índice S é aplicado a problemas de mecânica dos solos agrícolas, principalmente: preparo de solo e *hardsetting*, também conhecido como caráter coeso (Dexter, 2004b).

Neste sentido, o autor se concentra na facilidade com que o solo pode ser manejado para fins agrícolas, o que ele chama de “*workability*” (trabalhabilidade). Desta maneira, são analisados temas como a utilização do índice S para estimar a friabilidade e a “trabalhabilidade” do solo.

Adicionalmente, sugere um segundo índice baseado na taxa de variação do stress efetivo com relação à mudança no conteúdo de água no ponto de inflexão da CCRAS para avaliar (quantitativamente) o caráter coeso do solo (*hardsetting*): o índice H. Este índice foi utilizado por de Lima et al. (2014) em solos coesos na faixa costeira do Brasil, indicando que a dureza destes pode ser satisfatoriamente quantificada pelo mesmo.

Já no terceiro documento, Dexter (2004c) estuda a relação do S com a condutividade hidráulica não saturada. De forma geral, mostra que possuem uma forte correlação e comenta que o valor do $S = 0,035$ para diferenciar entre solos de boa e pobre qualidade; neste caso, não possui uma significância especial.

2.3 Determinação de indicadores de qualidade física do solo e crescimento das plantas em campo (*in situ*) e laboratório (*ex situ*)

Asgarzadeh et al. (2014) identificaram uma ausência de publicações no tocante à comparação dos valores do LLWR e IWC utilizando dados obtidos em campo e laboratório (i.e., retenção de água no solo e resistência a penetração). Ademais, mencionaram que tampouco tinha-se investigado detalhadamente a consistência entre estes dados (campo e laboratório) na determinação da água disponível do solo.

Diante desta lacuna de informações, os autores objetivaram, entre outras coisas, investigar a consistência entre as medições em campo e laboratório das propriedades hídrico-mecânicas do solo para determinação dos modelos LLWR, IWC e S-index.

Dentre os resultados, destacam-se as observações sobre as diferenças entre as CCRAS e os parâmetros de ajuste do modelo de van Genuchten (1980) nos diferentes esquemas avaliados e, por conseguinte, nos valores de AD empregando distintas abordagens para sua determinação. Além disso, os valores de resistência à penetração de raízes obtidos em campo foram significativamente menores em umidades volumétricas similares, principalmente na faixa seca da CCRAS. As diferenças entre os valores de AD e S-index surgem da dissimilaridade das CCRAS; já no LLWR e IWC provêm tanto da CCRAS quanto da CRP.

Neste documento, pode-se perceber a influência da metodologia utilizada (e.g., equipamento, tamanho da amostra de solo, etc.), bem como das condições de contorno na determinação dos indicadores de qualidade do solo.

2.4 Uso de softwares no cálculo de indicadores de qualidade física do solo e disponibilidade de água para as plantas

Embora alternativas como o LLWR, IWC, E_l e S-index tenham sido apresentadas para determinar a QFS e a AD, seu cálculo pode ser complexo, trabalhoso e demorado.

Conscientes disto, pesquisadores como Leão & Silva (2004), Asgarzadeh et al. (2014) e, recentemente, de Lima et al. (2016) apresentam em seus artigos algoritmos simplificados para determinar o LLWR usando Microsoft Excel[®] (Microsoft Corporation, Redmond, WA, USA); o software SAWCal e o pacote *soilphysics* para o programa R[®] (R Core Team, 2016), respectivamente.

De forma clara, estas publicações pretendem popularizar e promover o uso destes IQS na agricultura e na ciência do solo.

2.5 Agricultura de sequeiro no mundo

A agricultura de sequeiro é o sistema de produção agrícola predominante, tendo-se, da área mundial cultivada atualmente (1.600 Mha), cerca de 80 por cento (1.300 Mha) com este tipo de sistema (FAO, 2011).

Ainda que este sistema dependa das chuvas para produção (i.e., sem nenhuma fonte permanente de irrigação), a agricultura de sequeiro, é responsável por fornecer cerca de 60 por cento da produção agrícola global (FAO, 2011).

Adicionalmente, é importante destacar que o sequeiro é o sistema no qual os pequenos produtores predominam, ou seja, agricultores com menores condições financeiras; e onde, os riscos econômicos são maiores. Neste sistema, níveis mais altos de entrada (insumos, tecnologia, etc.) e gerenciamento, podem aumentar a produtividade, porém, um número importante de agricultores não possui condições de pagar os custos ou assumir os riscos (FAO, 2011).

2.6 Produção de cana-de-açúcar no Brasil

A cana-de-açúcar é uma das principais culturas do mundo, sendo cultivada em mais de 100 países. Não obstante, cerca de 80% da produção do planeta, está concentrada em dez países. O Brasil e a Índia respondem, em conjunto, por pouco mais da metade da cana produzida mundialmente com o 37,8 e 19,6%, respectivamente (novaCana, 2008; FAO, 2012).

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, estima-se uma área cultivada de 9.098,03 mil hectares, com produção aproximada de 642,10 milhões de toneladas de colmos na safra 2014/2015 (CONAB, 2014).

O setor sucroenergético no Brasil gera 1,2 milhões de empregos diretos e contribui ao PIB setorial com US\$ 48 bilhões (UNICA, 2014). Entre seus produtos encontram-se: a) o açúcar, sendo o principal produtor e exportador, com 45% do produto comercializado no mundo; b) o bioetanol, compartilhando liderança com os Estados Unidos (EUA) — ambos países são responsáveis por 70% da fabricação deste combustível; e c) a bioeletricidade, uma “energia limpa e renovável”, feita a partir da biomassa (CIB, 2009; UNICA, 2014).

A produtividade média nacional atingiu $\approx 71,31 \text{ t ha}^{-1}$ para a safra 2014/2015 (CONAB, 2014). Atualmente, o estado de São Paulo é o principal produtor de cana-de-açúcar no país com $\approx 4.685,7$ mil hectares plantados, apresentando produtividade média de $\approx 73,3 \text{ t ha}^{-1}$.

2.6.1 Produção de cana-de-açúcar no Estado de Pernambuco - Brasil

Pernambuco ocupa o sétimo lugar nacional com 260,1 mil hectares (2,9%) e produtividade média de $56,6 \text{ t ha}^{-1}$ (CONAB, 2014). Para o estado, a agroindústria da cana-de-açúcar é uma das atividades agrícolas mais importantes, pois gera grande quantidade de empregos diretos nas áreas rurais e industriais, proporcionando uma notável contribuição social (Simões Neto et al., 2012).

Contudo, as projeções de rentabilidade sob o custo total para a produção de cana-de-açúcar são negativas na maioria dos cenários para a safra 2014/2015 na região Nordeste do Brasil. Estima-se, que os produtores de cana atingirão rentabilidade positiva sobre o custo total apenas para produtividades superiores a $98,0 \text{ t ha}^{-1}$. Assim, apenas os produtores mais eficientes conseguirão atingir rentabilidade (CNA, 2014).

2.6.1.1 Limitações agrícolas dos solos cultivados com cana-de-açúcar no Estado de Pernambuco - Brasil

Em Pernambuco, uma importante fração da produção de cana-de-açúcar é cultivada na Mesorregião da Mata, que compreende uma estreita faixa de terra paralela ao litoral, situada entre o rebordo oriental do Maciço da Borborema e o mar (Andrade, 2001). Portanto, a cultura da cana-de-açúcar ocupa grande área do ecossistema dos Tabuleiros Costeiros — unidade de paisagem que acompanha todo o litoral do Nordeste do país (Pacheco & Cantalice, 2011b; Dias, 2012; EMBRAPA, 2014).

Entre a diversidade de solos situados nos Tabuleiros Costeiros, destacam-se os Latossolos, Argissolos e Neossolos Quartzarênicos, que embora profundos e situados numa topografia de plana a suave ondulada — o que é favorável para a produção agrícola —, apresentam limitações à produção vegetal (Cintra & Libardi, 1998; Corrêa et al., 2008; EMBRAPA, 2014).

Entre as limitações agrícolas naturais que possuem os solos dos Tabuleiros Costeiros podem ser citadas a baixa fertilidade, baixa reserva de nutrientes e horizontes subsuperficiais endurecidos (coesos) que reduzem a profundidade efetiva do solo (Corrêa et al., 2008; EMBRAPA, 2014).

Autores como Cintra & Libardi (1998), ainda consideram que a errática distribuição de chuvas associada à presença de horizontes coesos situados próximos à superfície, promove, de maneira frequente, sérios problemas no suprimento de água para as plantas — consideração que pode ser aplicada à cana-de-açúcar. Complementarmente, Safadoust et al. (2014) expõem que a escassez de umidade no solo não é apenas o resultado da baixa precipitação sazonal e a errática distribuição de chuvas; é também o resultado da pobre qualidade estrutural dos solos cultivados.

Uma característica dos solos coesos é sua pobreza estrutural (Daniells, 2012). O baixo nível de estruturação leva a grandes perdas de água, influenciando no balanço hídrico do solo, limitando sua capacidade de retenção de água e, assim, a absorção pela cultura (Safadoust et al., 2014). Além do mais, na medida que estes solos secam, sua dureza aumenta rápida e significativamente (Silveira et al., 2010; Daniells, 2012) e, por conseguinte, suas limitações físicas também (Giarola & da Silva, 2002).

Neste contexto, ao serem consideradas as limitações agrícolas dos solos coesos dos Tabuleiros Costeiros, é claro que qualquer tentativa de manejo visando incrementar a produtividade da cana-de-açúcar, além de visar a melhoria das condições químicas, deverá valorizar a otimização da sua qualidade física.

Uma alternativa para melhorar a qualidade física do solo e promover a produtividade da cana-de-açúcar, resulta da integração do manejo mecanizado à outras práticas agrícolas (Cintra et al., 2006; Surendran et al., 2016).

2.6.1.2 Avaliação do manejo mecanizado na qualidade física do solo para o crescimento da cana-de-açúcar no Estado de Pernambuco - Brasil

O sistema convencional de plantio no cultivo da cana-de-açúcar emprega operações mecanizadas para realização do preparo do solo (Duarte Jr & Coelho, 2008), visando a geração de condições ideais para o desenvolvimento do sistema radicular (Tavares et al., 2010). No Nordeste, práticas como a gradagem e subsolagem são realizadas na implantação e renovação dos canaviais com diversos fins, por exemplo: aumentar a profundidade efetiva do solo mediante a incorporação de adubos verdes ou de corretivos do solo (Cintra et al., 2006; Vasconcelos et al., 2010; de Oliveira et al., 2011).

No entanto, estudos realizados em solos representativos dos Tabuleiros Costeiros cultivados com cana-de-açúcar sob manejo mecanizado (gradagem e subsolagem) têm reportado efeitos desfavoráveis em diversos atributos físicos do solo, por exemplo: aumento na dispersão de argila e redução da estabilidade de agregados, o que influencia outros atributos físicos do solo como a estrutura do solo (da Silva et al., 2006).

Nesta região canavieira, outros estudos também têm avaliado os efeitos do uso e manejo na qualidade física do solo utilizando diferentes propriedades físicas relacionadas com sua estabilidade estrutural tais como: agregação, porosidade total, condutividade hidráulica, densidade do solo e resistência a penetração, entre outros (Vasconcelos et al., 2010; Pacheco & Cantalice, 2011a; Gomes et al., 2012; Melo et al., 2014; Vasconcelos et al., 2014).

Não obstante, torna-se complexo analisar de maneira isolada o efeito desses atributos sobre o crescimento das plantas, pois embora vários atributos

possam ser utilizados para avaliar a qualidade física do solo, a resposta das plantas dependerá da interação entre eles (Letey, 1985).

Neste sentido, uma nova geração de indicadores já vem sendo utilizada no Brasil para melhor avaliar a qualidade estrutural e a disponibilidade hídrica para as plantas, entre eles o Intervalo Hídrico Ótimo (Pacheco & Cantalice 2011b), S-index (Tormena et al., 2008) e H-index (de Lima et al., 2014). Adicionalmente, resulta interessante a determinação de outros ainda não popularizados no país, como o IWC e E_i , por fornecerem distintas abordagens e informações.

Apesar de serem indicadores atuais, em Pernambuco ainda são escassas as publicações que objetivem avaliar a influência do preparo mecanizado na qualidade física do solo no cultivo de cana-de-açúcar a partir dos mesmos.

3 Objetivo Geral

- Avaliar a influência do preparo mecanizado na qualidade física do solo e no potencial de resposta da cana-de-açúcar submetida a regime de sequeiro no Estado de Pernambuco, Brasil.

3.1 Objetivos Específicos

- Avaliar o efeito do preparo mecanizado do solo na densidade, agregação e porosidade total da camada superficial do solo em estudo.
- Estudar a distribuição da porosidade do solo nos diferentes sistemas de manejo, bem como suas implicações na condutividade hidráulica, retenção de água e resistência do solo à penetração.
- Determinar a influência do preparo mecanizado no caráter coeso da camada superficial do solo em estudo a partir do índice H.
- Verificar a tendência da resistência do solo à penetração entre sistemas de manejo em campo (*in situ*) e laboratório (*ex situ*).
- Comparar a produtividade e qualidade da cana-de-açúcar entre sistemas de manejo.

4 Material e Métodos

A presente pesquisa foi desenvolvida na região Nordeste do Brasil, durante o período compreendido entre junho de 2014 e abril de 2016. Para tal fim, um experimento em campo e diversos ensaios laboratoriais foram efetuados nas instalações do programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), campus Recife, cujos pormenores são apresentados a seguir.

4.1 Descrição do ambiente de estudo

4.1.1 Área experimental: localização, clima, tipo de solo e histórico de uso

Localização

A área experimental situa-se no campo da Estação Experimental de Cana-de-açúcar de Carpina (EECAC), unidade de pesquisa pertencente à UFRPE (Figura 1). Com coordenadas geográficas 7°50'58" latitude Sul, 35°51'19" longitude Oeste e 184 m do NMM. A EECAC encontra-se localizada no Município de Carpina, na mesorregião da Zona da Mata e microrregião da Mata Setentrional Pernambucana (CPRM/PRODEEM, 2005).

Clima

A caracterização climática de Carpina tem sido realizada por distintas instituições. As principais metodologias para sua descrição foram os modelos de Köppen – Geiger (1961) e Thornthwaite – Mather (1955). Com base nestas classificações, Carpina possui o clima As' conforme Köppen – Geier, e C1'sw conforme Thornthwaite – Mather. Ambas confirmam maior precipitação pluviométrica nos meses de inverno e déficit em verão, além de uma temperatura média anual superior aos 25°C (CPRM/PRODEEM, 2005; da Silva et al., 2014).



Figura 1. Localização geográfica da área de estudo.

Solo

O solo próximo à área experimental tem sido classificado por diversos autores conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), como ARGISSOLO AMARELO distrocoeso (Simões Neto et al., 2012; da Costa et al., 2014).

Histórico de uso da área experimental

Com relação ao uso, a área experimental possui um histórico de cultivo com cana-de-açúcar em diferentes sistemas de manejo.

4.2 Desenho experimental: delineamento, tratamentos, caracterização do solo e operações em campo

O experimento em campo foi desenhado com o intuito de avaliar a influência do manejo nas propriedades físicas do solo e, conseqüentemente, na produtividade do cultivo da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*).

Por se tratar de um experimento que precisou de maquinário agrícola para realizar seletivamente o preparo do solo, houve a necessidade de considerar superfícies com dimensões maiores para esse fator. O delineamento experimental escolhido justifica-se por atender estas exigências.

4.2.1 Delineamento experimental, tratamentos e unidades experimentais

O delineamento utilizado foi blocos ao acaso, com quatro repetições. Cada bloco continha duas unidades experimentais (parcelas) de igual tamanho (Figuras 2 e 3). Os tratamentos (T_1 e T_2) consistiram no preparo do solo: T_1 = com preparo (CP), e T_2 = sem preparo (SP), conforme a Figura 2.

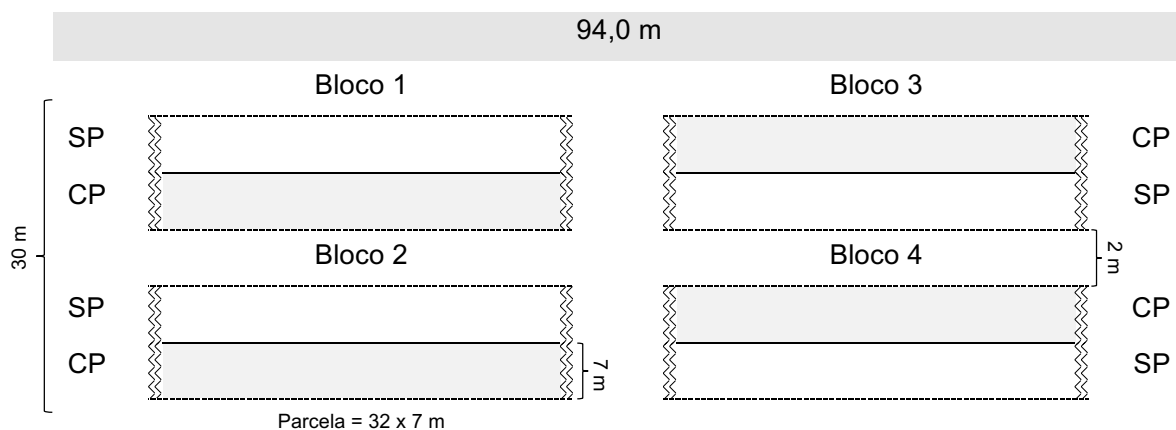


Figura 2. Representação do experimento em campo. Os blocos contêm duas parcelas (diferenciadas entre si pela área sombreada), com e sem preparo do solo (CP e SP).

Para a amostragem do solo e das plantas (biometria), contemplou-se apenas um segmento das unidades experimentais, isto é, a área útil. Para delimitar essa área, seis sulcos centrais com 32 m de comprimento foram considerados, desprezando-se dois sulcos das extremidades da parcela e 1 m

de cada lado das cabeceiras dos sulcos como bordadura, conservando uma área útil com 150 m^2 (Figura 3).

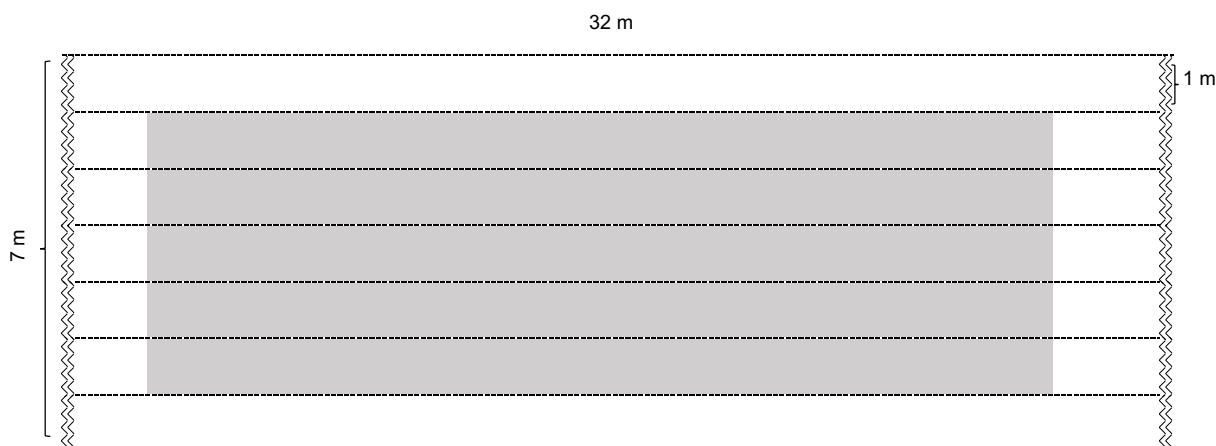


Figura 3. Detalhe da unidade experimental (parcela). A parte sombreada representa a área útil e a linha tracejada o sulco de plantio.

4.2.2 Avaliação da fertilidade, correção e adubação do solo

Após delimitar a área experimental, foi realizada a caracterização química e física da camada superficial (0 – 30 cm) do ARGISSOLO AMARELO distrocoeso para avaliação de sua fertilidade.

A seguir, são descritos os procedimentos, apresentados os resultados e expostas as considerações da avaliação supracitada.

4.2.2.1 Amostragem e caracterização do solo

A campanha de amostragem consistiu em retirar, com auxílio de um trado Holandês, cinco subamostras de solo na área útil de cada parcela, na camada de 0 – 0,30 m. As subamostras eram depositadas em recipiente plástico e misturadas até atingir a homogeneidade, constituindo uma amostra composta. Na sequência, uma fração de $\approx 1 \text{ kg}$ de cada amostra composta foi colocada numa sacola plástica devidamente identificada.

Para caracterizar a densidade do solo foram coletadas 40 amostras com estrutura preservada, procedimento que foi realizado por meio de anéis de aço (volume $\approx 100 \text{ cm}^3$) inseridos no solo com auxílio de um amostrador tipo Uhland

a uma profundidade de $\approx 0,15$ m. Em seguida, ao serem retiradas, as amostras foram envolvidas com papel filme para evitar perda de umidade, e envelopadas com plástico bolha para evitar perturbações por impacto.

Posteriormente, as amostras foram trasladadas aos laboratórios de fertilidade e física de solo da UFRPE onde foram procedidos os respectivos ensaios, seguindo-se metodologias propostas pela EMBRAPA (2011).

Nas tabelas 1 e 2 são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização química e física da camada superficial, respectivamente.

4.2.2.2 Avaliação da fertilidade do solo

A avaliação da fertilidade do solo foi realizada a partir de dados de caracterização do solo (Tabelas 1 e 2). As considerações foram realizadas com base nos critérios de interpretação de análises do solo do EPAMIG (2012) e APAL (2013).

A camada superficial apresentou acidez ativa (atual, livre ou iônica) muito elevada (valores de pH muito baixos), acidez trocável com alto teor de Al^{3+} , e o valor de acidez potencial ($\text{Al}^{3+} + \text{H}^+$) também é considerado alto — esta condição potencialmente diminui a atividade microbiana do solo, reduz a disponibilidade de nutrientes essenciais e favorece a toxidez por alumínio que afeta o crescimento radicular e, conseqüentemente, restringe seu acesso a água e nutrientes.

A capacidade de troca catiônica é alta (T) e com baixa saturação por bases (V). Enquanto a capacidade de troca catiônica efetiva (t) é média e com baixa porcentagem de saturação por alumínio (m) — isto indica que a camada superficial do solo contém quantidades consideráveis de H^+ .

A respeito dos cátions trocáveis, os teores de K^+ e Mg^{2+} são baixos e, no caso do Ca^{2+} , médio. O teor de P disponível (solúvel em ácido fraco) foi médio também.

Esta avaliação teve intuito de determinar as doses adequadas de corretivos e de adubo a serem aplicados no canavial e determinar a textura e densidade média do solo.

Tabela 1. Características químicas do ARGISSOLO AMARELO distrocoeso utilizado no experimento (valores médios).

Camada (cm)	pH (H ₂ O)	P ⁽¹⁾ K ⁽¹⁾ mg dm ⁻³		Ca ⁽²⁾	Mg ⁽²⁾	Al	H + Al ⁽³⁾	V m %		T cmol _c dm ⁻³	t
0 – 30	4,45	29,78	0,05	1,90	0,33	1,30	7,58	23,35	13,18	9,86	3,58

⁽¹⁾ Extrator Mehlich-1; ⁽²⁾ extrator KCl 1 mol L⁻¹; ⁽³⁾ extrator acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹ – pH 7,0; P = Fósforo; K = Potássio; Ca = Cálcio; Mg = Magnésio; Al = Alumínio; H + Al = Hidrogênio + Alumínio; V = Saturação por bases; m = Saturação por alumínio; T = Capacidade de troca de cátions em pH 7,0; t = Capacidade de troca de cátions no pH natural.

Tabela 2. Características físicas do ARGISSOLO AMARELO distrocoeso utilizado no experimento (valores médios).

Camada (cm)	Areia (50 - 200 μm)	Silte (2 - 50 μm)	Argila (<2 μm)	Classe textural	Ds g cm ⁻³
	g kg ⁻¹				
0 – 30	695	101	205	Franco-argilo-arenosa	1,65

4.2.2.3 Corretivos e adubação do solo

Como corretivos do solo, foram utilizados calcário (CaCO_3) e gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). O calcário foi aplicado um mês antes da implantação do canavial, em dose única, e distribuído homogeneamente na área experimental. O gesso foi aplicado manualmente logo após o calcário.

A quantidade de calcário para adequar o pH do solo foi estimada a partir dos resultados da análise de solo. O método empregado foi baseado na elevação da saturação por bases (V). No caso da cultura da cana-de-açúcar, a recomendação é aproximar esse valor a 60% da capacidade de troca catiônica (T) a pH 7. O cálculo foi realizado para uma profundidade de 0 – 0,30 m, a partir da equação (1), conforme de Oliveira et al. (2007).

$$QC = \frac{[(60 - V)T]}{PRNT} \quad (1)$$

Onde: QC = quantidade de calcário em t ha^{-1} ; V = saturação por bases atual do solo; T = capacidade de troca de cátions a pH 7,0; PRNT = poder relativo de neutralização total do corretivo utilizado.

As doses de gesso não foram calculadas, mas pré-estabelecidas com base em resultados reportados em pesquisas anteriores. Portanto, foi estabelecida a dose média ($\approx 2 \text{ t ha}^{-1}$) que tem mostrado ser eficiente para o fornecimento de cálcio e melhoria do sistema radicular da cana-de-açúcar em solos semelhantes na região (da Rocha et al., 2008).

A adubação foi realizada um mês após semear a cana. A dosagem utilizada para nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), foi baseada nas recomendações de adubação do Instituto Agrônomo de Pernambuco (Cavalcanti, 1998) e na análise de solo (Tabela 1). De modo que a adubação consistiu na aplicação de 60 kg ha^{-1} de N, 120 kg ha^{-1} de P_2O_5 e 90 kg ha^{-1} de K_2O no fundo do sulco, e teve como fonte o fertilizante formulado 12 – 24 – 18 (N – P – K).

4.2.3 Operações em campo

4.2.3.1 Controle de plantas não desejadas

Para eliminar os resíduos da cultura anterior e, posteriormente, realizar o controle de plantas não desejadas, foram aplicados dois tipos de herbicidas: i) Glifosato (pós-emergente, não seletivo) e ii) Metribuzin (pré-emergente, seletivo para cana-de-açúcar), em doses de 4 e 3 L ha⁻¹, respectivamente.

4.2.3.2 Preparo do solo

Por ser considerado como tratamento, o preparo mecanizado do solo foi realizado de forma seletiva, como descrito anteriormente. Para esse processo, foram utilizados um subsolador de duas hastes com 0,60 m cada; e uma grade pesada de 34 discos com diâmetro de 32 polegadas. Conseqüentemente, o preparo consistiu na passagem do subsolador (subsolagem), onde houve a inserção das hastes no solo até uma profundidade média de 0,45 m; prosseguida da grade pesada (gradagem), a qual atingiu com os discos uma profundidade média de 0,30 m. Em seguida, foram estabelecidos sulcos com espaçamento constante de 1 m (entre linha) e profundidade média de 0,25 m.

4.2.3.3 Época de semeadura e caracterização do cultivar

O canavial foi implantado no mês de julho de 2014. O plantio foi realizado manualmente, utilizando-se pedaços de colmo com três gemas, distribuídos uniformemente nos sulcos. A densidade de plantio foi de ≈ 18 gemas por metro linear.

Por apresentar rendimento e adaptabilidade acima da média, a cultivar utilizada foi a RB867515. No Quadro 1 são apresentadas algumas características morfológicas e agroindustriais deste cultivar (Simões Neto & Melo, 2005).

Quadro 1. Características morfológicas e agroindustriais do cultivar RB867515.

Cultivar RB867515			
Características Morfológicas		Características Agroindustriais	
Hábito de crescimento	Ereto	Brotação planta e soca	Boa
Perfilhamento	Médio	Fechamento entrelinha	Bom
Diâmetro de colmo	Médio	Vel. de crescimento	Rápido
Colmos	Cilíndricos	Produção agrícola	Alta
Entrenós	Cilíndricos	Teor de sacarose	Alto
Cor do colmo (sob palha)	Verde-arroxeado	PUI ¹	Médio
Cor de colmo (exposto ao sol)	Roxo intenso	Teor de fibra	Médio
Tamanho de gemas	Médio	Maturação	Tardia
		Florescimento	Alto
		Data de plantio	Verão
Tipo de gema	Pentagonal	Exigência de fertilidade	Baixa

4.3 Condução do experimento

4.3.1 Análises biométricas, produtividade e características agroindustriais da cana de açúcar

De acordo com Marafon (2012), a produtividade da cana-de-açúcar pode ser estimada a partir de parâmetros biométricos. Neste estudo, foram considerados como componentes de produtividade da cana-de-açúcar: o diâmetro, a altura, a massa úmida e o número de colmos industrializáveis por unidade de área (Silva et al., 2008).

Iniciou-se a coleta dos dados biométricos, em abril de 2015 (nove meses após plantio). Neste período, foram obtidos os dados de diâmetro e altura do colmo, considerando 60 plantas selecionadas ao acaso, na área útil de cada

¹ Período de utilização industrial

parcela. Simultaneamente, foi contabilizado o número de perfilhos industrializáveis presentes em 24 metros de sulco.

Posteriormente, durante a colheita da cana-de-açúcar, em novembro de 2015, foram retiradas duas amostras de colmos. A primeira, utilizada para obtenção da massa úmida dos colmos. A segunda, foi encaminhada ao Laboratório Agroindustrial da Usina Petribu S/A, em Pernambuco, onde foram analisadas algumas características agroindustriais (i.e., °Brix, Fibra, Pureza, PC e ATR), também chamadas variáveis tecnológicas.

4.4 Amostragem e caracterização física do solo

Para avaliar os efeitos dos tratamentos nas propriedades físicas do solo, foi preciso realizar a coleta de diferentes tipos de amostras (em anéis, agregados e terra fina), após a colheita manual da cana-de-açúcar.

Embora o sistema radicular da cana-de-açúcar possa atingir camadas mais profundas do solo, a maior parte da biomassa radicular ($\approx 50\%$) encontra-se próxima à superfície, e apresenta um declínio exponencial (na biomassa, no comprimento, ou em ambas) com o aumento da profundidade (Smith et al., 2005). Por esse motivo, limitou-se a amostragem e, conseqüentemente, a avaliação à camada de 0 – 0,30 m.

Para coletar as amostras com estrutura preservada, foram retiradas aleatoriamente 36 amostras de solo nas entrelinhas da área útil de cada uma das 8 parcelas. Procedimento que foi realizado por meio de anéis de aço com volume de $\approx 100 \text{ cm}^3$ ($\approx 5 \times \approx 5 \text{ cm}$, diâmetro e altura) inseridos no solo com um amostrador tipo Uhland a uma profundidade de $\approx 0,15 \text{ m}$, totalizando 288 amostras (8 parcelas x 36 amostras ou repetições). Em seguida, ao serem retiradas, as amostras eram envolvidas com papel filme para evitar perda de umidade, e envelopadas com plástico bolha para evitar perturbações por impacto.

A amostragem para obtenção dos agregados do solo e terra fina (TF) consistiu em coletar, por meio de um trado Holandês, cinco amostras simples de cada parcela e depositá-las em uma sacola plástica previamente identificada.

Posteriormente, as amostras (anéis e sacolas) foram trasladadas ao laboratório de Física de Solo da UFRPE, campus Recife, onde foram preparadas, e procedidos os ensaios.

4.4.1 Preparação de amostras no laboratório

A preparação das amostras no laboratório consistiu em retirar o excesso de solo das extremidades de cada anel (toaleta), e organizá-las em 8 grupos (parcelas) com 36 amostras de solo (repetições), conforme os tratamentos. Seguindo esse esquema de agrupamento, foram realizados os ensaios para avaliar os parâmetros físico-hídricos do solo (K_{sat} , CCRAS, DTP, RP e D_s).

Já para a obtenção de agregados e terra fina, as amostras foram secas ao ar por um período de 48 h e, posteriormente, peneiradas separando os agregados com diâmetro médio de 5,90 mm (passados em peneira de 7,1 mm e retidos na peneira de 4,70 mm) e as partículas de solo com diâmetro menor do que 2 mm (TFSA). Essas amostras foram utilizadas para os ensaios de estabilidade de agregados e granulometria, respectivamente.

4.5 Ensaio e caracterização físico-hídrica do solo

4.5.1 Granulometria

A análise granulométrica foi realizada pelo método do densímetro proposto em Gee & Or (2002), modificado e descrito por Almeida (2008), cujo princípio se baseia na sedimentação das partículas sólidas que compõem o solo. Após a adição do dispersante químico ($4 \text{ g L}^{-1} \text{ NaOH} + 10 \text{ g L}^{-1} \text{ hexametáfosfato-Na}$), e agitação por 16 h (agitador tipo Wagner). A areia total foi obtida por peneiramento úmido (0,053 mm), sendo 24 h o tempo para sedimentação do silte e leitura da densidade da suspensão (argila mais dispersante), por meio do densímetro de Bouyoucos (152 H). O silte foi obtido por diferença, a partir da equação (2).

$$\text{Silte} = 100 - (\% \text{ areia} + \% \text{ argila}) \quad (2)$$

4.5.2 Distribuição de agregados

Para determinar a distribuição (por tamanho) dos agregados, foi adotado o procedimento de peneiramento via úmida (Yoder, 1936), conforme descrito em Kemper & Chepil (1965), com as modificações sugeridas por Nimmo & Perkins (2002). Adicionalmente, as seguintes modificações foram realizadas:

- i. Utilizou-se uma mesa de peneiramento por via húmida marca TECNAL, modelo TE-3300, com capacidade para três jogos de peneiras, cada um com 5 peneiras distintas;
- ii. Os diâmetros (abertura de malha) das peneiras utilizadas no aparelho de Yoder (1936) foram: 2,00; 1,00; 0,50; 0,25 e 0,125 mm;
- iii. O equipamento foi calibrado para realizar agitação fixa de 25 OPM (oscilações por minuto) durante 10 min.
- iv. O diâmetro médio da amostra (agregados) para realizar o ensaio foi de 5,90 mm (passados em peneira de 7,1 mm e retidos na de 4,70 mm).

A distribuição dos agregados por classe de diâmetro foi expressa pelo diâmetro médio ponderado (DMP) por meio da equação (3); e pelo diâmetro médio geométrico (DMG), conforme equação (4).

$$DMP = \sum_{i=1}^n (X_i \cdot W_i) \quad (3)$$

Em que: X_i – é o diâmetro médio das classes (mm); W_i – é a proporção de cada classe em relação ao total.

$$DMG = \exp \frac{\sum_{i=1}^n n \log X_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (4)$$

Em que: n – é a porcentagem de agregados estáveis em cada classe.

4.5.3 Condutividade hidráulica saturada

A condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) foi determinada em laboratório conforme Reynolds & Elrick (2002). Neste ensaio, aplicou-se uma carga hidráulica constante (1/3 da altura do corpo de prova) em cada amostra de solo, até registrar um fluxo constante. A medida quantitativa da K_{sat} se obteve a partir da equação de Darcy (5).

$$K_{sat} = \frac{V_a \cdot L}{A \cdot T_{fluxo} (\Psi_c - \Psi_b)} \quad (5)$$

Em que: K_{sat} é a condutividade hidráulica saturada, expressa em cm h^{-1} ; V_a é o volume de água coletado (cm^3); L é a altura do corpo de prova (cm); A , é a área da seção transversal do anel (cm^2); T_{fluxo} , é o tempo de fluxo da água pelo corpo de prova (h); Ψ_c é o potencial total na parte de cima do corpo de prova (cm de coluna de água = cca); Ψ_b é o potencial total na parte de baixo do corpo de prova (cca).

4.5.4. Curva característica de retenção de água no solo (CCRAS)

Para construir a CCRAS, ensaios foram realizados visando determinar simultaneamente o conteúdo de água e o respectivo potencial em que se encontra retida no solo (Gupta & Wang, 2007). Os métodos tradicionais para obtenção destes dados no laboratório, objetivam equilibrar² o conteúdo de água entre as amostras e uma série de pontos (potenciais mátricos, equilibrados via tensões ou pressões) pré-estabelecidos (da Silva et al., 2006).

Neste estudo, os equipamentos utilizados foram a mesa de tensão (Leamer & Shaw, 1941; de Oliveira, 1968), para equilibrar as amostras nos potenciais de 1, 6 e 10 kPa; e a câmara de Richards (Richards, 1965), para os

² O equilíbrio entre a amostra de solo e a tensão ou pressão aplicada pode ser determinado pelo processo de pesagem, até que a amostra de solo atinja peso constante ou o dreno do equipamento pare de gotejar.

potenciais de 33, 100, 300, 500, 1.000 e 1.500 kPa, valores distribuídos entre a faixa de disponibilidade de água para as plantas, respectivamente.

Cada ponto da curva foi obtido utilizando-se quatro repetições por tratamento (parcelas) e diferentes amostras, pois na sequência, foi preciso determinar a resistência do solo à penetração para cada conjunto de amostras após atingirem o equilíbrio hidráulico.

A partir dos dados experimentais, a curva foi ajustada aplicando-se o modelo de van Genuchten (1980), baseado em regressão múltipla não linear, conforme a equação (6).

$$w = (w_{sat} - w_{res})[1 + (\alpha h)^n]^{-m} + w_{res} \quad (6)$$

onde: w = conteúdo gravimétrico de água em cada tensão; w_{sat} = define a assíntota superior da curva ($h \rightarrow 0$) e representa o conteúdo de água no solo saturado (kg kg^{-1}); w_{res} = define a assíntota inferior da curva ($h \rightarrow \infty$) e representa o conteúdo de água residual no solo (kg kg^{-1}); h = é a tensão da água no solo (kPa); n = é adimensional e reflete a forma da curva; $m = 1 - 1/n$ (Mualem, 1976); α = é expresso em kPa^{-1} e é afetado pela escala da tensão da água no solo (h); os parâmetros n , e α são obtidos pelo método dos quadrados mínimos.

Os cálculos e gráficos foram realizados com os softwares Excel® e R® (R Core Team, 2016), utilizando o pacote soilphysics (de Lima et al., 2016) para este último.

4.5.5 Distribuição do tamanho de poros

Para caracterizar a distribuição do tamanho de poros, utilizou-se o método de dessorção de água, considerado como método padrão (Flint & Flint, 2002). Este método baseia-se na teoria da capilaridade, em consequência, assume entre outras coisas, que os poros são cilíndricos (tubos capilares). De acordo com esta teoria, os poros maiores (macroporos) drenarão primeiro, e sucessivamente, poros menores perderão água com o incremento das tensões ou pressões aplicadas, de acordo com a equação (7).

$$\Delta P = (2\sigma/r_c) = (2\sigma \cos \theta_{contato} / r_p) \quad (7)$$

Em que: ΔP é o gradiente de pressão (kPa) na interface ar-água; σ é a tensão superficial da água ($J m^{-2}$); r_c é o raio de curvatura do menisco (m); $\theta_{contato}$ é o ângulo de contato (graus) da água com a superfície sólida, e; r_p é o raio do tubo capilar, neste caso, o poro (m).

Deste modo, utilizou-se a classificação sugerida por Prevedello (1996), em que: “macroporos”, são poros com raio $> 150 \mu m$ (que perdem água em tensões < 1 kPa); mesoporos, possuem raio entre 150 e $25 \mu m$ (drenados com tensões entre 1 e 6 kPa); microporos, apresentam raio entre 25 e $0,1 \mu m$ (drenados com tensões entre 6 e 1.500 kPa; e os criptoporos, com raio $< 0,1 \mu m$ (drenados com tensões > 1.500 kPa).

A curva de distribuição do tamanho dos poros do solo, foi determinada conforme Dexter (2004c).

4.5.6 Resistência à penetração em laboratório

Após as amostras atingirem o equilíbrio em cada ponto preestabelecido para elaboração da CCRAS, foram realizados, na sequência, os ensaios de resistência do solo à penetração (RP).

O equipamento utilizado em laboratório foi um penetrômetro de bancada marca Marconi® modelo MA933, conectado a um computador (via USB), onde um software específico realiza a leitura da célula de carga e gera um arquivo de texto com os resultados para cada amostra (anel), sendo os dados registrados em MPa. Levando em consideração os critérios expostos em Davidson (1965), o Quadro 2 mostra algumas informações relevantes do equipamento.

Quadro 2. Especificações do penetrômetro de bancada Marconi® modelo MA933.

Dados Técnicos	Descrição
Controle de velocidade	Ajustado digitalmente a 4 mm min^{-1}
Célula de carga	Capacidade máxima para 20 kg
Pino (agulha) de penetração	Altura de 80 mm, \varnothing superior de 3 mm, \varnothing inferior de 4 mm, e ponta cônica angular de 30°
Sistema de leitura / registro de dados	Fonte de alimentação, amplificador para célula de carga, conversor analógico digital de 8 bits, conexão com o computador via USB e software para leitura da célula de carga gerando um arquivo texto

4.5.7 Resistência à penetração em campo

Para avaliar a RP em campo, utilizou-se um medidor automatizado de compactação do solo, marca Falker®, modelo Solo Track PLG5300 (Quadro 3).

O procedimento consistiu em selecionar três pontos de maneira aleatória nas entrelinhas da área útil. Nesta etapa, foram realizados três testes por ponto na camada de 0 – 0,30 m, totalizando nove leituras por parcela. Simultaneamente, amostras de solo eram coletadas para, na sequência, determinar (em laboratório) o teor de água do solo no momento dos ensaios.

Quadro 3. Especificações do medidor automatizado de compactação do solo, marca Falker®, modelo Solo Track PLG5300.

Dados Técnicos	Descrição
Índice de Cone Máximo	Cone tipo 2 (6.800 kPa)
Resolução da medição índice de cone	Cone tipo 2 (7,7 kPa)
Velocidade Nominal de Inserção	24 mm s^{-1}
Força Máxima Suportada	90 kgf (Haste tipo 2)

4.5.8 Densidade do solo

A densidade do solo, conforme sugerem Grossman & Reinsch (2002), foi obtida para cada amostra por meio do método do anel volumétrico, e calculada segundo a equação (8).

$$D_s = \frac{M_{ss}}{V_t} \quad (8)$$

Em que: D_s é a densidade do solo (g cm^{-3}); M_{ss} é a massa contida no anel volumétrico e seca a 105°C (g); V_t é o volume total do solo, assumindo como sendo o volume do anel volumétrico (cm^3).

4.6 Determinação do IHO, IWC, E_i , S-index & H-index

Neste estudo, os cálculos e gráficos para determinação dos modelos (IHO, IWC e E_i) foram realizados com os softwares Excel[®] e R[®] (R Core Team, 2016), utilizando o pacote soilphysics (de Lima et al, 2016) para este último.

É fundamental destacar que, tanto para determinar o IHO quanto o IWC foi atendida a recomendação feita por Pillatti et al., (2012), isto é, calcular o limite inferior correspondente à RP em função do teor de argila. Assim, como limite inferior, foi adotado o parâmetro de maior valor entre a umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) e a θ_{RP} , na qual o solo oferece um valor de 4 MPa.

4.6.1 Intervalo Hídrico Ótimo (IHO)

O IHO foi calculado utilizando o procedimento proposto por da Silva et al. (1994), com os ajustes e equações descritos por Leão et al. (2004; 2005) e de Lima et al. (2016). A seguir, são apresentadas as equações utilizadas para determinação do IHO:

- i. Para caracterizar a influência da estrutura do solo no fenômeno de retenção de água, foi utilizada a função apresentada por da Silva et al. (1994), a qual incorpora a variabilidade da D_s à função proposta por

Ross et al. (1991), conforme exposta em Leão et al. (2004; 2005), equação (9).

$$\theta = \exp(\alpha + b\rho) h^c \quad (9)$$

Em que: θ é o conteúdo volumétrico de água no solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); ρ é a densidade do solo (Mg m^{-3}); h é o potencial mátrico (cm); e α , b , c são parâmetros de ajuste do modelo.

- ii. A curva de resistência do solo à penetração foi obtida em função do conteúdo volumétrico de água ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e a D_s (Mg m^{-3}), utilizando o modelo proposto por Busscher (1990), equação (10):

$$\text{RP} = b_0 \theta^{b_1} \rho^{b_2} \quad (10)$$

Em que: RP é a resistência à penetração do solo (MPa); e b_0 , b_1 , e b_2 são parâmetros de ajuste do modelo.

- iii. Os conteúdos de água ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) na capacidade de campo (θ_{CC}) e no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) foram calculados utilizando o modelo de retenção de água no solo (eq. 9), a partir das equações (11) e (12), respectivamente.

$$\theta_{\text{CC}} = \exp(\alpha + b\rho) h_{\text{CC}}^c \quad (11)$$

$$\theta_{\text{PMP}} = \exp(\alpha + b\rho) h_{\text{PMP}}^c \quad (12)$$

- iv. O conteúdo de água ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) no qual a RP atinge o valor crítico de 4 MPa (θ_{RP}), foi calculado utilizando o modelo de RP (eq. 10) a partir da equação (13).

$$\theta_{\text{RP}} = \left(\frac{\text{RP}}{b_0 \rho^{b_2}} \right)^{\frac{1}{b_1}} \quad (13)$$

- v. O conteúdo de água ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) no qual o conteúdo de ar é igual a 0,10 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, representado por θ_{Ar} , foi calculado a partir da equação (14), onde ρ_p refere-se à densidade de partículas.

$$\theta_{\text{Ar}} = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_p}\right) - 0.1 \quad (14)$$

4.6.2 Integral Water Capacity (IWC)

O IWC foi calculado utilizando o procedimento proposto por Groenveld et al. (2001), com os ajustes e equações descritos por Asgarzadeh et al. (2010; 2011 e 2014) e de Lima et al. (2016). A seguir, são apresentadas, e brevemente explicadas, as equações utilizadas para determinação do IWC:

- I. O IWC (eq. 15) é definido por Groenveld et al. (2001) como:

$$\text{IWC} = \int_0^{\infty} \left(\prod_{i=1}^n \omega_i \right) C(h) dh \quad (15)$$

Em que: $C(h)dh$ é o “*differential (or specific) water capacity*” ou “capacidade de água diferencial” ($C(h) \text{ cm}^{-1}$); ω_i são funções, e representam as diferentes propriedades físicas do solo que limitam a disponibilidade de água para as plantas (i até n), com valores de zero quando completamente restringida e incrementando continuamente até 1, quando não restringida; Π indica que as funções deverão ser multiplicadas; e h é o potencial mátrico, expresso em cca e com sinal positivo.

- II. A função do “*differential (or specific) water capacity*” ($C(h)$) representa a inclinação da CCRAS, e foi obtida a partir da primeira derivada da equação de van Genuchten (1980; eq. 6), conforme a equação (16):

$$C(h) = (\theta_s - \theta_r)(n - 1)h^{-1}(\alpha h)^n [1 + (\alpha h)^n]^{\frac{1-2n}{n}} \quad (16)$$

Neste caso, para otimizar o ajuste da CCRAS, o modelo de van Genuchten (1980) foi aplicado a dois segmentos dos dados experimentais de retenção de água: a “faixa úmida” (θ_s até 330 cca) e a “faixa seca” (θ_{330} até 15.000 cca), como descrito por Groenvelt et al. (2001). Assim, as funções foram aplicadas apenas no segmento da curva em que são relevantes.

- III. Na faixa úmida, a elevada condutividade hidráulica ($\omega_k(h)$; eq. 17) e a aeração ($\omega_a(h)$; eq. 19) do solo, foram calculadas a partir das seguintes equações:

$$\omega_k(h) = \left[\frac{K_r(330)}{K_r(h)} \right]^{p=0,08} \quad (17)$$

Em que: $\omega_k(h)$ é 1 no potencial mátrico (h) de 330 cca e decresce a medida que h desce, porém, nunca atinge o valor de zero, mesmo quando o solo esteja saturado; $p = 0,08$ é um valor estabelecido por Groenvelt et al. (2001) de forma arbitrária e precisa ser determinado experimentalmente; e $K_r(h)$ é a condutividade hidráulica relativa (Mualem, 1976), definida pela equação (18).

$$K_r(h) = \left[1 - (\alpha h)^{n-1} [1 + (\alpha h)^n]^{\left[\frac{1}{n}-1\right]} \right]^2 [1 + (\alpha h)^n]^{\frac{1-n}{2n}} \quad (18)$$

Em que: $K_r(h)$ é a condutividade hidráulica relativa; α (cm^{-1}) e n são parâmetros de ajuste.

$$\omega_a(h) = A \log \left(\frac{h}{h_{10}} \right) \quad (19)$$

$$A = \frac{1}{\log \left[\frac{h_{15}}{h_{10}} \right]} \quad (20)$$

Em que: $\omega_a(h)$ tem valor de 0 quando o conteúdo volumétrico de ar corresponde a 0,1 (h_{10}) e vai até 1 quando atende 0,15 $m^3 m^{-3}$ (h_{15}).

- IV. Na faixa seca, a elevada resistência do solo à penetração ($\omega_R(h)$) e a baixa condutividade hidráulica ($\omega_{Kdry}(h)$) do solo, foram calculadas a partir das equações 21 e 23, respectivamente.

$$\omega_R(h) = 4,5 - (\alpha h^b) \quad (21)$$

Em que se assume que a restrição $\omega_R(h)$ inicia em 1,5 MPa (com valor de 1) e aumenta até 4,5 MPa (com valor de 0); e α e b são parâmetros de ajuste da curva de resistência do solo à penetração (eq. 22).

$$SR(h) = \alpha h^b \quad (22)$$

$$\omega_{Kdry}(h) = \left[\frac{12,000}{h} \right]^{-d} \quad (23)$$

Em que se assume que a restrição $\omega_{Kdry}(h)$ inicia em $h = 12.000$ cca (com valor de 1) e aumenta até $h = 15.000$ cca (com valor de 0); e d são parâmetros de ajuste da função de condutividade hidráulica relativa (eq. 24).

$$K_r(h) = Ch^d \quad (24)$$

A função $K_r(h)$, nesse caso, foi alimentada com os dados de h entre 12.000 e 15.000 cca, obtidos experimentalmente.

- V. As funções $\omega_i(h)$ aplicadas em cada faixa da CCRAS (úmida e seca), foram multiplicadas pela “capacidade de água diferencial” ($C(h)$), gerando a “*effective differential water capacity*” ou “capacidade de água diferencial efetiva” ($E_i(h)$), conforme a equação (25), e posteriormente integradas (eq. 15).

$$E_i(h) = \omega_i(h) C(h) \quad (25)$$

4.6.3 Integral energy (E_I)

O E_I ou “energia integral” foi calculado utilizando a equação de Minasny & McBratney (2003), conforme apresentada por Asgarzadeh et al. (2011; 2014) e de Lima et al. (2016). A seguir, é apresentada, e brevemente explicada, a equação utilizada para determinação do E_I (eq. 26):

$$E_I = \frac{1}{10SAW} \int_{h_i}^{h_f} h \left(\prod_{i=1}^n \omega_i(h) \right) C(h) dh \quad (26)$$

Em que: h_i e h_f são os limites de h (cca) estabelecidos (segundo a abordagem utilizada, IHO, IWC, etc.), e $h_i > h_f$; SAW ($m^3 m^{-3}$) é o conteúdo volumétrico de água disponível no solo, podendo ser calculado a partir diferentes abordagens (IHO, IWC, CCRAS, etc.); a constante 10 é utilizada para converter as unidades da E_I de cca a $J kg^{-1}$.

4.6.4. S-index e H-index

O S-index e H-index foram determinados conforme Dexter (2004ab).

4.7 Análises estatísticas

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA). Uma vez que os parâmetros apresentaram diferença, as médias foram comparadas por meio do teste de Tukey a 5% de probabilidade. Para este fim, foi utilizado o software Sisvar[®].

5 Resultados e Discussão

5.1 Atributos físicos do solo

O preparo mecanizado do solo produziu diferenças em alguns dos seus atributos físicos ($p < 0,05$). A seguinte seção é discutida com base nos dados apresentados na Tabela 3.

5.1.1 Densidade do solo

O valor médio de densidade do solo em ambos tratamentos foi maior do que $1,48 \text{ g cm}^{-3}$, o que de acordo com de Lima et al. (2014) permite seu enquadramento como solo coeso (hardsetting), em razão de sua organização estrutural ser considerada “ruim”.

Por outro lado, não se obteve evidência suficiente ($p > 0,05$) de que o preparo mecanizado do solo teve influência sobre a densidade do solo após 17 meses de sua realização. Este resultado, possivelmente, deve-se à temporalidade de seus efeitos (Cintra et al., 2006) e a sua relação com a granulometria e a matéria orgânica do solo, pois de acordo com Rawls (1983) são os principais modificadores deste atributo. Outra hipótese, é que a movimentação do solo, ocasionada pelo volume dos implementos, tenha compactado o espaço poroso do solo circundante, assim, os valores médios de D_s se mantiveram constantes.

Diversos estudos tampouco reportaram evidências de que práticas de manejo mecanizado tiveram influência na densidade do solo (Costa et al., 2006; Karuma et al., 2014; Jabro et al., 2016; de Moraes et al., 2016).

Portanto, neste caso, a densidade do solo não se mostrou como um atributo do solo sensível o suficiente para detectar os efeitos do manejo sobre sua qualidade física.

Tabela 3. Atributos físicos da camada superficial (0 – 30 cm) do ARGISSOLO AMARELO distrocoeso com e sem preparo mecanizado.

	Atributos físicos do solo									
	Ds		DMP		DMG		PT		Ksat	
	g cm ⁻³		mm		mm		cm cm ⁻³		mm h ⁻¹	
	SP	CP	SP	CP	SP	CP	SP	CP	SP	CP
Média	1,65 a1	1,63 a1	0,72 a1	0,72 a1	0,56 a1	0,53 a1	0,35 a1	0,36 a2	38,0 a1	55,3 a2
F	1,393		0,19		0,33		14,400		6,386	
P	0,2826		0,8936		0,5862		0,009		0,045	
C. V. (%)	1,46		5,30		12,65		0,77		20,80	

Médias seguidas por letras e números iguais não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey.

5.1.2 Distribuição por tamanho dos agregados estáveis em água

No ensaio de peneiramento via úmida (Yoder, 1936), com base nos valores de DMP, os agregados se mostraram indistintamente ($p > 0,05$) instáveis (Bissonnais, 1996). No que se refere à sua distribuição por tamanho, o DMG indicou maior ocorrência numa classe similar para os dois tratamentos ($p > 0,05$).

As definições de solos coesos que constam na literatura confirmam a congruência destes resultados (Young et al., 1991; Giarola & da Silva, 2002).

Autores como Giarola et al. (2011) expõem que os horizontes com caráter coeso, quando úmidos, se caracterizam por serem estruturalmente instáveis. Inclusive, os agregados de um horizonte desta natureza, que já foi submetido ao cultivo, podem ser, não apenas parcial, mas totalmente desintegrados sob umedecimento (Mullins, 1997; Giarola & da Silva, 2002).

Também é importante citar a revisão de literatura sobre solos coesos apresentada por Daniells (2012), pois em tal documento são considerados, principalmente, trabalhos que demonstram o comportamento hardsetting devido ao colapso dos agregados do solo durante seu umedecimento e sua pouca resiliência. O mesmo autor indica que a maior contribuição para o caráter coeso é dada pela produção de uma grande quantidade de partículas primárias.

Neste sentido, Bissonnais (2006) explica que vários são os mecanismos responsáveis pela desagregação do solo. No tocante a solos coesos, Giarola et al. (2011) e Daniells (2012) mencionam dois mecanismos importantes: i) a dispersão (físico-química); e ii) o “*slaking* ou *slumping*” que consiste na quebra dos agregados durante seu umedecimento em razão da compressão do ar aprisionado no interior. Com a entrada de ar nos poros dos agregados durante o molhamento, a pressão interna aumenta, promovendo, pela pouca estabilidade desses agregados, com forças de agregação menores que a pressão interna, a ruptura dos agregados, por vezes esboroando-se.

Como mencionado no parágrafo anterior, a dispersão desses solos também contribui para tal processo, sendo principalmente influenciada pela redução das forças de atração entre os colóides do solo durante seu umedecimento (Bissonnais, 2006). Alguns cátions monovalentes como o lítio (Li^+) e o sódio (Na^+) favorecem este processo (Bronick & Lal, 2005; Mauri et al., 2011). No que se refere ao “*slaking*”, de forma geral, é influenciado pelo teor de

argila, pois este mecanismo decresce à medida que o teor de argila aumenta (Bissonnais, 2006).

Considerando que o solo em estudo se encontra numa área relativamente homogênea, em condições similares e não possui caráter salino nem sódico, mas ácido, a possível causa da instabilidade foi o baixo teor de argila (Bissonnais, 2006) e matéria orgânica do solo (Tisdall & Oades, 1982), uma vez que o processo de agregação é determinado por diversos fatores, entre eles, o carbono orgânico do solo, a biota edáfica, as ligações iônicas, a argila e os carbonatos (Chan & Sivapragasam, 1996; Bronick & Lal, 2005; Duiker, 2006).

Dentre as possíveis técnicas de manejo para melhorar a estabilidade dos agregados em solos coesos, as que consideram a modificação de sua granulometria (textura) possuem uma aplicabilidade limitada (Daniells, 2012). Em contraste, práticas como plantio direto (Castro Filho et al., 1998), adição de polímeros (Melo et al., 2014), "*mulch*" (Materechera, 2009) e esterco bovino (Nciizah & Wakindiki, 2012), têm demonstrado ser efetivas neste aspecto.

Agregados mais estáveis e de maior tamanho (i.e., $\geq 2,00$ mm) são desejáveis na agricultura, pois oferecem melhores condições físicas para o crescimento das culturas (Kemper & Chepil, 1965; Melo et al., 2014).

Neste estudo, não se obteve evidência suficiente de que o manejo tenha influenciado a qualidade dos agregados, isto é, em sua estabilidade (DMP) e distribuição (DMG).

5.1.3 Porosidade total e sua distribuição por tamanho (diâmetro)

Os resultados indicam que o preparo mecanizado teve influência na porosidade total da camada coesa do solo em estudo ($p < 0,05$).

O preparo mecanizado promoveu um incremento de 2,78% na porosidade total do solo (Figura 4). Este acréscimo, possivelmente, deve-se à movimentação e homogeneização do solo efetuada pelos implementos agrícolas durante as operações de preparo, as quais modificaram sua distribuição (Kay & VandenBygaart, 2002).

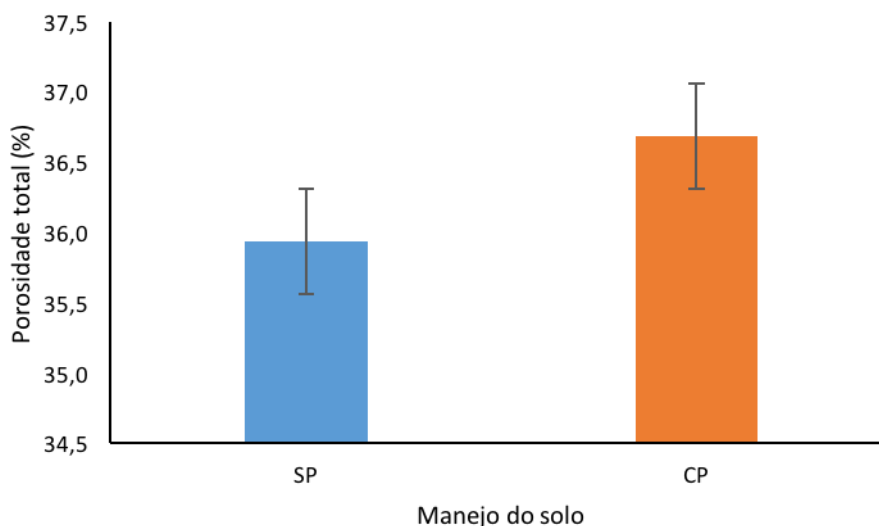


Figura 4. Porosidade total da camada superficial (0 – 30 cm) do ARGISSOLO AMARELO distrocoeso com e sem preparo mecanizado.

A Figura 5 diz respeito à redistribuição de poros. No solo com preparo, pode-se perceber um acentuado incremento na ocorrência de mesoporos, assim como da fração maior dos microporos. Em contrapartida, no solo sem preparo, os macroporos se apresentam em destaque, bem como a fração menor dos microporos. Comportamentos semelhantes têm sido descritos por Hill et al. (1985) e Kay & VandenBygaart (2002), mas em outros tipos de solo.

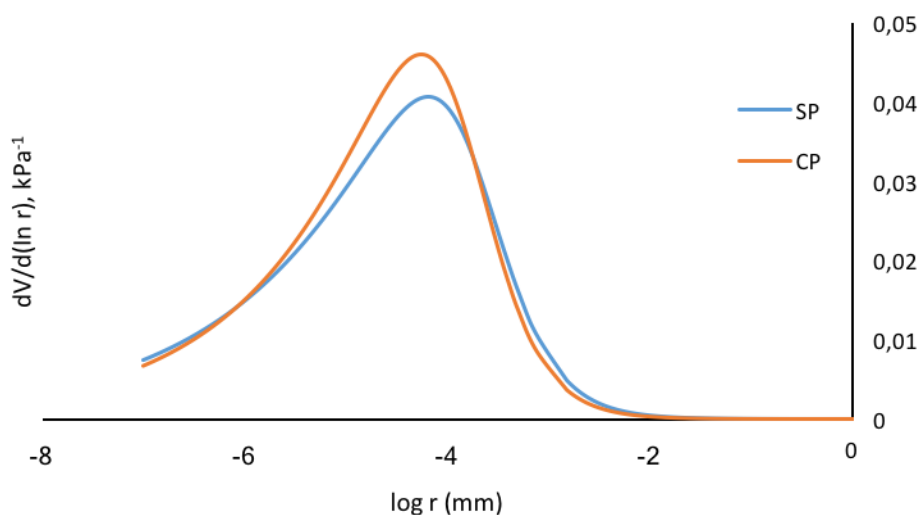


Figura 5. Distribuição do tamanho dos poros do solo na camada em estudo (0 – 30 cm) nos tratamentos SP e CP, determinados pela derivação da equação de ajuste da CCRAS.

No solo com preparo, a menor frequência de macroporos possivelmente reflita a temporalidade do seu efeito, pois o manejo afeta, principalmente, a porosidade estrutural (Lipiec et al., 2006). A porosidade estrutural tem se mostrado susceptível à compactação (Dexter, 2004), portanto, estes resultados sugerem uma perda hierárquica (em ordem decrescente) dos efeitos do manejo mecanizado sobre este tipo de porosidade.

No solo sem preparo, o aumento da macroporosidade, possivelmente, foi promovido por uma progressiva produção de bioporos — isto é, poros provenientes da atividade biológica — e pelo arranjo de seus agregados (Kay & VandenBygaart, 2002; Klein & Libardi, 2002). Inclusive, Strudley et al. (2008) comenta que, nesta condição, a tendência é de incrementar a conectividade entre macroporos.

As implicações da mudança no meio poroso são discutidas mais adiante durante a avaliação de distintas propriedades hidráulicas e mecânicas do solo influenciadas por este atributo.

5.1.4 Condutividade hidráulica saturada

Os resultados do ensaio de condutividade hidráulica saturada refletem as mudanças na porosidade total do solo e sua redistribuição, indicando que o preparo mecanizado também influenciou neste atributo ($p < 0,05$), e confirmando o efeito residual deste tipo de manejo em horizontes coesos (Lipiec et al., 2006; Vieira & Klein, 2007; Prevedello et al., 2013; Kargas et al., 2016). Estas considerações são corroboradas por diversos estudos regionais em solos similares. Como exemplos são citados três trabalhos.

Paiva et al. (2000) avaliando as propriedades físico-hídricas em solos coesos da Bahia, concluíram que os menores valores de K_{sat} , foram resultado de uma maior frequência de microporos em associação a agregados de menor DMP. Posteriormente, Maia & Ribeiro (2004) e Silva et al. (2005), estudando diferentes manejos em solos coesos alagoanos cultivados com cana-de-açúcar, identificaram uma redução dos valores de K_{sat} quando comparados com solos da mata, o que também relacionaram a uma redução do diâmetro de poros.

Nesta pesquisa, o preparo mecanizado incrementou 45,5% a K_{sat} (Figura 6). Entre as potenciais vantagens deste aumento, encontra-se o maior fluxo de

água e transporte de solutos (e.g. nutrientes, adubos e corretivos) ao longo da camada (Dane et al., 2006). No entanto, ao facilitar o fluxo de água também se pode favorecer sua perda (além de solutos, simultaneamente) por drenagem e evaporação (Klute, 1965).

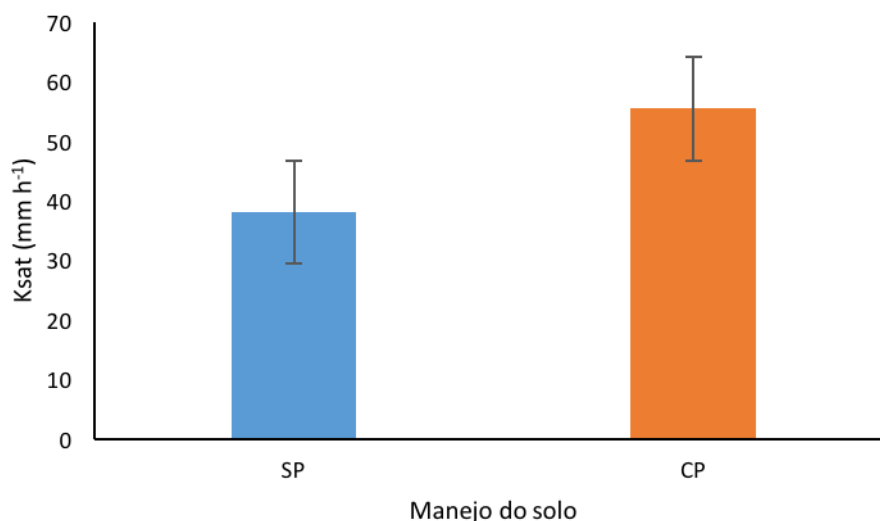


Figura 6. Condutividade hidráulica saturada da camada superficial (0 – 30 cm) do solo em estudo com e sem preparo mecanizado.

Neste seguimento, pode-se perceber que ao serem afetadas propriedades de armazenamento, possivelmente se comprometa a disponibilidade de água para as plantas e, ao mesmo tempo, algumas propriedades mecânicas vinculadas à umidade, por exemplo, a resistência do solo à penetração de raízes. Ambos fatores são de fundamental importância para a produção agrícola, especialmente, em solos coesos.

Contudo, o solo estudado apresentou valores altos de Ksat em ambos tratamentos (NRCS, 1993). Uma explicação possível, do ponto de vista físico, deve-se à sua granulometria (Tabela 1), pois solos arenosos oferecem, notavelmente, menor resistência ao fluxo de água através do seu sistema poroso (Bouma, 1977; Paiva et al., 2000; Dane et al., 2006).

5.2 Indicadores de qualidade física para o crescimento das plantas

A seguinte seção é discutida tendo-se como base os dados apresentados nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4. Valores dos indicadores de qualidade física do solo para os diferentes tratamentos (SP e CP).

Tratamento	$AD_{1,65}$	θ_{CC}	θ_{PMP}	IHO_{Ds}	$IHO_{1,65}$	$IWC_{1,65}$	E_i ($J\ kg^{-1}$)			S_{index}	θ_i	h_i	H_{index}
	$m^3\ m^{-3}$						AD	IHO	IWC				
SP	0,075	0,2148	0,1394	0,041	0,037	0,039	61,02	29,28	8,29	0,040	0,265	23	508,061
CP	0,074	0,2078	0,1339	0,055	0,036	0,037	57,13	29,03	8,87	0,046	0,255	28	528,576

Tabela 5. Parâmetros de ajuste (coeficientes) do IHO, CCRAS e CRP para os diferentes tratamentos (SP e CP).

Tratamento	IHO						CCRAS					Power model (RP)	
	a	b	c	b_0	b_1	b_2	θ_s	θ_r	α	n	m	a	b
	CRA			CRP			$m^3\ m^{-3}$	$m^3\ m^{-3}$	cm^{-1}	-		$MPa\ cm^{-1}$	
SP	-1,29	0,150	-0,099	0,005	-2,93	3,54	0,36	0,1180	0,133	1,302	0,23	0,256	0,4028
CP	-1,05	0,031	-0,108	0,002	-2,94	5,52	0,37	0,1184	0,100	1,351	0,26	0,254	0,4026

5.2.1 Retenção e disponibilidade de água no solo para as plantas

No campo da física do solo, a capacidade de retenção de água no solo, está associada, principalmente, à granulometria e suas propriedades estruturais (Gupta & Wang, 2007). O preparo mecanizado, ao modificar o meio poroso da camada em estudo, também modificou sua capacidade de retenção, armazenagem e disponibilidade de água, neste caso, para a cultura da cana-de-açúcar.

Na Figura 7 são apresentadas as CCRAS determinadas para cada tratamento na camada superficial (0 – 30 cm). Pode-se observar que, de forma geral, o preparo mecanizado promoveu um aumento na capacidade de “retenção” de água no solo em baixas tensões (i.e., ≤ 6 kPa), bem como um acréscimo na umidade de saturação. Em contrapartida, ocasionou uma diminuição em sua capacidade de armazenagem nos microporos (i.e., θ equilibradas em tensões entre 6 e 1.500 kPa).

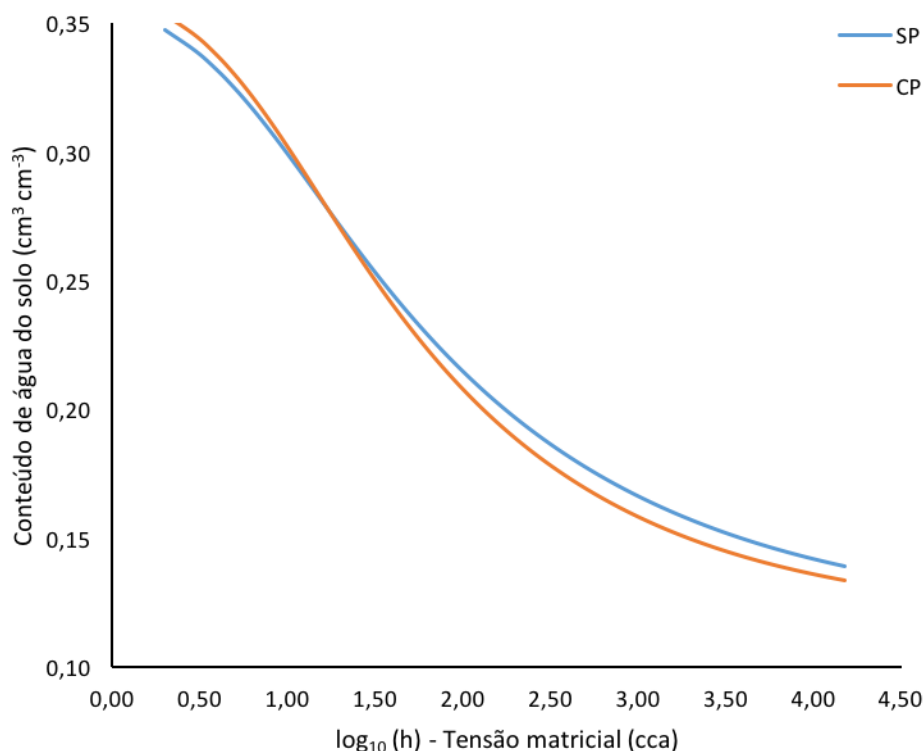


Figura 7. Curva característica de retenção de água do solo, na camada superficial (0 – 30 cm), com e sem preparo mecanizado.

Considerando as propriedades de retenção da camada em estudo, a extrapolação dos valores críticos (limites) comumente utilizados para o cálculo da água disponível no solo (θ_{CC} e θ_{PMP}) pode ser arbitrário e pouco assertivo para o manejo agrônômico da cana-de-açúcar em solos coesos.

A colocação feita no parágrafo anterior, faz referência à utilização das tensões correspondentes a $\theta_{CC} = 10$ kPa e $\theta_{PMP} = 1.500$ kPa para solos com textura predominantemente arenosa, em decorrência das implicações para sua estimativa de forma experimental (Kirkham, 2005). Adotando estes limites, os resultados indicam que o aumento na capacidade de retenção de água no solo ocasionado pelo preparo, não implicou em aumento na disponibilidade de água no solo para as plantas, uma vez que promoveu uma redução na retenção de água no intervalo de disponibilidade (i.e., nos microporos).

Na Figura 8, pode-se observar que o preparo do solo diminuiu os valores de θ_{CC} (equilibrada a 10 kPa) e θ_{PMP} (equilibrada a 1.500 kPa). Em termos relativos, a redução foi de 3,3 e 3,9% para θ_{CC} e θ_{PMP} , respectivamente. Em consequência, estas alterações reduziram em 1,3% a capacidade de água disponível do solo.

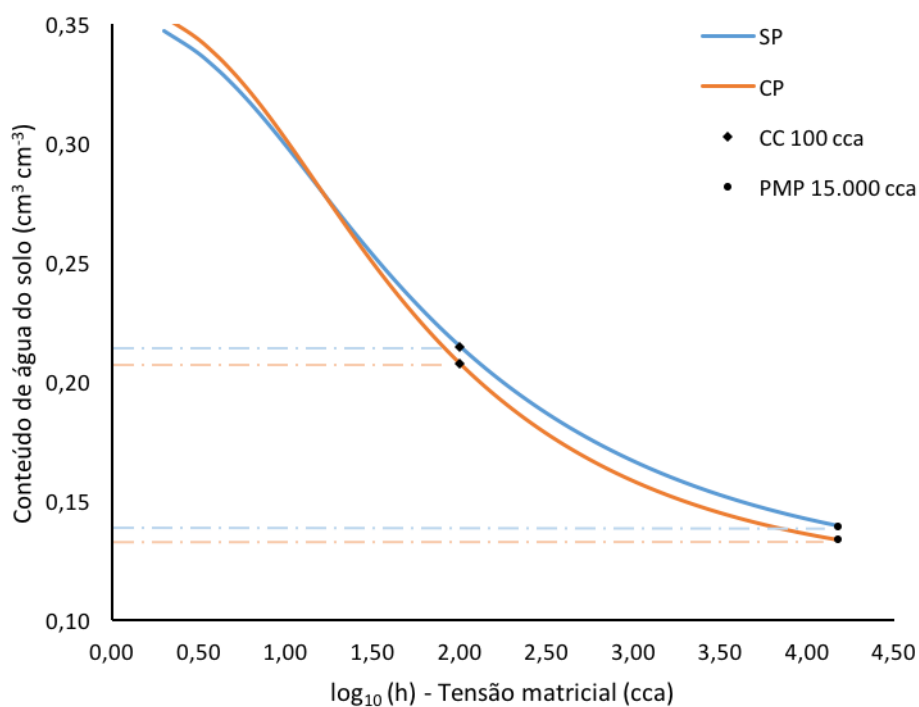


Figura 8. Água disponível para as plantas, na camada de 0 – 30 cm, para os tratamentos CP e SP.

Resultados similares foram apresentados por Silva et al. (2005), que utilizaram as mesmas tensões na definição de AD ($\theta_{CC10 \text{ kPa}} - \theta_{PMP1.500 \text{ kPa}}$) para solos coesos cultivados com cana-de-açúcar; o que sugere que solos com maior nível de compactação, como o caso do solo da área SP, apresentaram maior disponibilidade de água para as plantas, em decorrência da distribuição do diâmetro de seus poros, que favoreceu a uma maior quantidade de microporos na área.

Para elucidar melhor esta ideia, na Figura 9 pode-se observar a relação entre retenção de umidade e o tipo de poro. Observa-se que, da água do solo considerada conforme Briggs (1897) como capilar (i.e., $\approx 45\%$), quase a metade (i.e., $\approx 20\%$) se encontra retida em mesoporos (i.e., tensões entre 1 e 6 kPa) e uma fração adicional em microporos de maior tamanho (i.e., entre 6 e 10 kPa). Portanto, numa faixa de tensão que, nesta abordagem, não é considerada como disponível, mesmo que sua perda (e.g., drenagem) seja gradual e não abrupta.

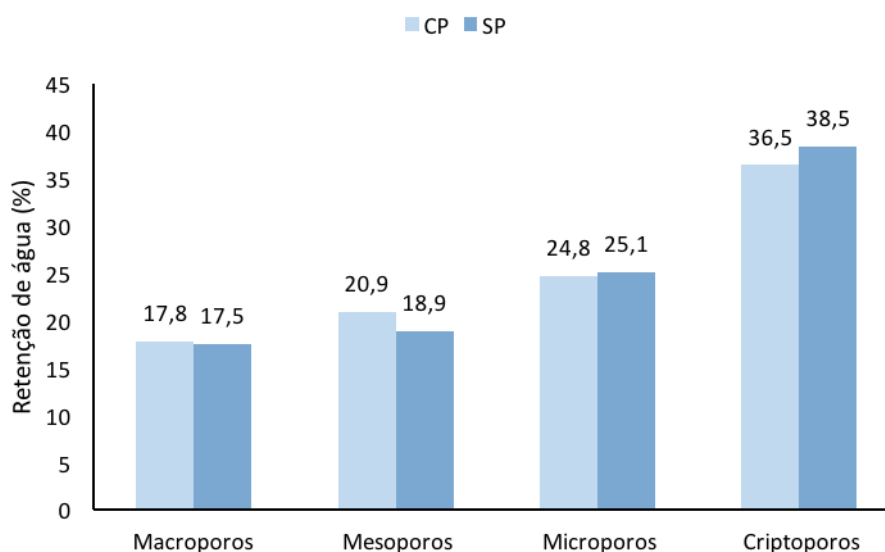


Figura 9. Relação retenção de água – tipo de poro, na camada de 0 – 30 cm, nos tratamentos CP e SP.

Não considerar a faixa de água em tensões menores do que as “habituais” umidades na capacidade de campo (i.e., $\theta_{CC} = 10$ ou 33 kPa) em solos coesos dos Tabuleiros Costeiros pode resultar em erro, principalmente em relação às dificuldades que o sistema radicular das culturas tem, devido à considerável

dureza desses solos, mesmo nesta faixa de umidade. Com relação a isto, autores comentam sobre a alta influência da umidade na RP.

A RP está inversamente relacionada com a umidade do solo, e seu aumento é notavelmente maior em solos com alta Ds (Ley, Mullins & Lal, 1995; Lin, He, & Chen, 2016). Neste sentido, Silveira et al. (2010) têm reportado altos valores de RP (> 2,5 MPa) para um ARGISSOLO AMARELO distrocoeso dos Tabuleiros Costeiros sob cultivo, em tensões consideradas baixas (10 kPa). Outra abordagem sobre esse comportamento dos solos coesos (hardsetting) é feita a seguir, utilizando outros índices como o S e o H.

5.2.2 Comportamento hardsetting (índices S e H)

A teoria S expõe que mudanças na QFS promovem modificações na CCRAS (Dexter, 2004abc). Nesta teoria, é possível utilizar o valor S para avaliar a estrutura do solo de forma independente ou em conjunto com outros modelos.

No caso de solos com comportamento hardsetting, o índice S pode ser utilizado para calcular o índice H — o qual estima a variação do stress efetivo com a variação em sua θ — e, assim, quantificar objetivamente este comportamento.

Nesta ótica, os resultados obtidos no experimento mostram que o preparo mecanizado do solo não melhorou sua qualidade física, pois os elevados valores de Ds e do índice H (stress efetivo), em ambos tratamentos, correspondem aos de um solo estruturalmente “pobre” e com “alto” comportamento hardsetting. Tais valores, foram semelhantes aos reportados por de Lima et al. (2014) em solos coesos de textura franco-argilo-arenosa.

Para melhor elucidar estas considerações, torna-se importante explicar que de acordo com as categorias de classificação sugeridas por Dexter (2004a), o valor do S indica que a camada coesa, em ambos tratamentos (SP e CP), possui uma boa qualidade estrutural ($S > 0,035$). Não obstante, o mesmo autor explica que esta classificação é empírica e, além disso, pode não ser adequada para solos de com textura predominantemente arenosa (como neste caso).

Por outro lado, de Lima et al. (2014) utilizando a relação entre índice S e índice H para estudar a QFS e o stress efetivo em diferentes solos coesos dos

Tabuleiros Costeiros, evidenciaram (experimentalmente) a correlação positiva entre a D_s e o comportamento hardsetting.

Estes autores, afirmam que solos com $D_s > 1,53 \text{ g cm}^{-3}$ — considerada como crítica —, precisam de uma maior atenção devido às limitações agrícolas causadas por seu comportamento hardsetting e qualidade estrutural. Estas considerações devem ser atendidas, pois, neste estudo, os valores médios de D_s correspondem a 1,65 (SP) e 1,63 g cm^{-3} (CP), sendo classificadas, no caso, como densidades críticas.

Além do mais, ainda de acordo com de Lima et al. (2014), a relação entre os índices S e H é a que diferencia entre solos coesos de “boa” e “pobre” organização estrutural, sendo o valor crítico para esta classificação equivalente a $H = 292 \text{ kPa}$. Os valores para esta variável (no ponto de inflexão (P_i) da CCRAS) na camada coesa do solo em estudo, correspondem a $H = 508,1$ (SP) e 528,6 (CP), também apresentados graficamente na Figura 10, estando bem acima do valor crítico (linha tracejada).

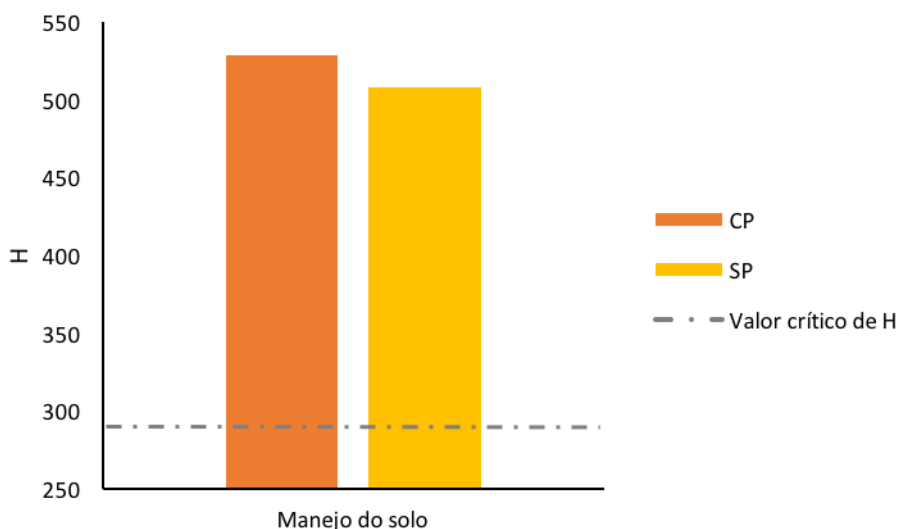


Figura 10. Valores do índice H ($\text{kPa por } \Delta\theta \text{ g g}^{-1}$) na camada superficial (0 – 30 cm) do ARGISSELO AMARELO distrocoeso com e sem preparo mecanizado.

Atendendo as considerações supracitadas, determinou-se a classificação estrutural da camada coesa em estudo como “pobre” — conforme mencionado anteriormente. Em outras palavras, embora os valores do índice S mostrem um solo de boa qualidade, seu comportamento hardsetting, com valores acima do nível crítico, não permite considerá-lo como solo estruturalmente “bom”. Tal

classificação, reflete a instabilidade estrutural mostrada pelo solo (SP e CP) nos ensaios de agregação (via úmida) discutida anteriormente neste documento.

Para realizar mais uma consideração sobre o índice S, na Figura 11 são apresentadas as CCRAS indicando-se o ponto de inflexão e a faixa de disponibilidade de água. Pode-se observar que o ponto de inflexão em ambas CCRAS se localiza nas tensões de $h_i = 23$ cca (SP) e $h_i = 28$ cca (CP), isto é, menores que as consideradas na θ_{CC} ($h = 10$ kPa).

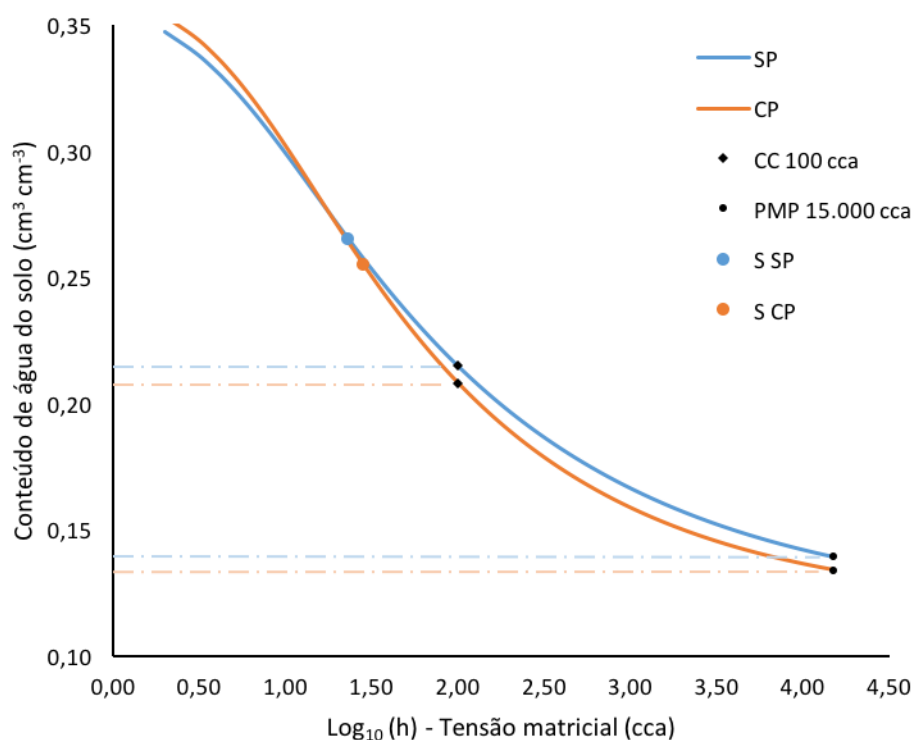


Figura 11. Ponto de inflexão da CCRAS na camada superficial (0 – 30 cm) do ARGISSOLO AMARELO distrocoeso com e sem preparo mecanizado.

Estas informações são interessantes, pois Dexter (2004a) explica que poros estruturais do solo são drenados entre a θ_s e o ponto de inflexão (P_i) da CCRAS. A partir deste ponto (P_i), a drenagem corresponde aos poros texturais.

Neste raciocínio, valores baixos de tensão no P_i , indicam menor ocorrência de poros estruturais. Por conseguinte, poros texturais são predominantemente responsáveis pela retenção de água nesta camada de solo.

Em decorrência da mudança no tamanho de poro (estrutural \rightarrow textural), uma possível hipótese seria que há uma acentuada diminuição na condutividade hidráulica no ponto de inflexão da CCRAS e, tal ponto, poderia servir como

referência para determinar a umidade na capacidade de campo em solos coesos de textura arenosa, com valores de $h_i < 10$ kPa.

Tais considerações poderiam ser extrapoladas para os solos coesos do Brasil, que apresentem características semelhantes aos aqui estudados. Contudo, é preciso um maior embasamento teórico para levantar formalmente esta hipótese.

5.2.3 Intervalo Hídrico Ótimo

Outro interessante “approach” para avaliação dos efeitos do preparo mecanizado na qualidade física do solo para o crescimento da cana-de-açúcar corresponde ao Intervalo Hídrico Ótimo (da Silva et al., 1994).

A partir dos dados experimentais, foram determinados os modelos correspondentes à CRP e CRA, cujos ajustes explicaram 77 (SP) e 76% (CP) da variação nos valores de RP, bem como 84 (SP) e 87% (CP) nos de θ , respectivamente (Tabela 6).

Tabela 6. Coeficientes de determinação dos modelos CRP e CRA para o IHO.

Tratamento	CRP	R ² (adj)	CRA	R ² (adj)
SP	$PR = b_0 \theta^{b1} \rho^{b2}$	0,77	$\theta = \exp(\alpha + b\rho)h^c$	0,84
CP		0,76		0,87

Os modelos apresentaram, para ambos tratamentos, comportamentos semelhantes aos reportados por Guedes Filho et al. (2013) e Tormena et al. (1999), cujas pesquisas avaliaram distintos sistemas de manejo (incluindo o preparo mecanizado) a partir da caracterização do IHO.

Com base nos coeficientes das equações (Tabelas 5 e 6), pode-se verificar que a CRP apresentou correlação negativa com o conteúdo de água, bem como uma correlação positiva com a Ds. No caso da CRA, houve correlação negativa com o potencial mátrico e positiva com a Ds. Autores como Silva et al. (2015) descrevem estes comportamentos como típicos.

Nas Figuras 12 e 13 são apresentadas graficamente as quatro umidades limitantes para o crescimento da cana-de-açúcar (i.e., θ_{CC} , θ_{PMP} , θ_{Ar} e θ_{RP}) e o

IHO em distintas D_s , correspondentes à camada coesa (0 – 30 cm) do solo em estudo SP e CP, respectivamente.

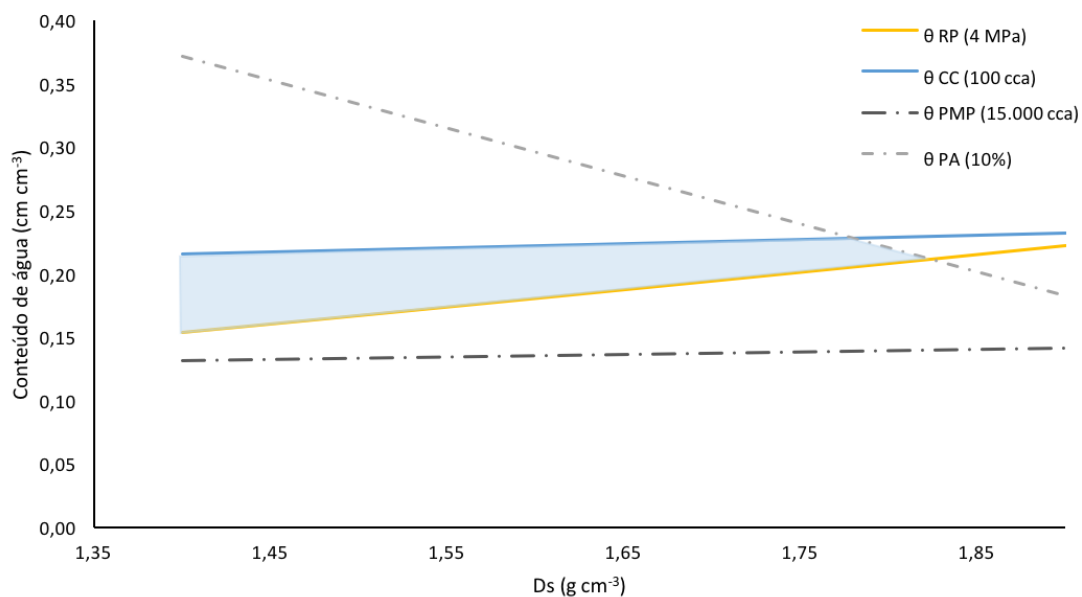


Figura 12. Modelagem da variação do conteúdo de água (θ) com a densidade do solo (D_s) nos níveis críticos de θ_{CC} , θ_{PMP} , θ_{Ar} e θ_{RP} da camada superficial (0 – 30 cm) sem preparo mecanizado no ARGISSOLO AMARELO distrocoeso. A área sombreada representa o IHO.

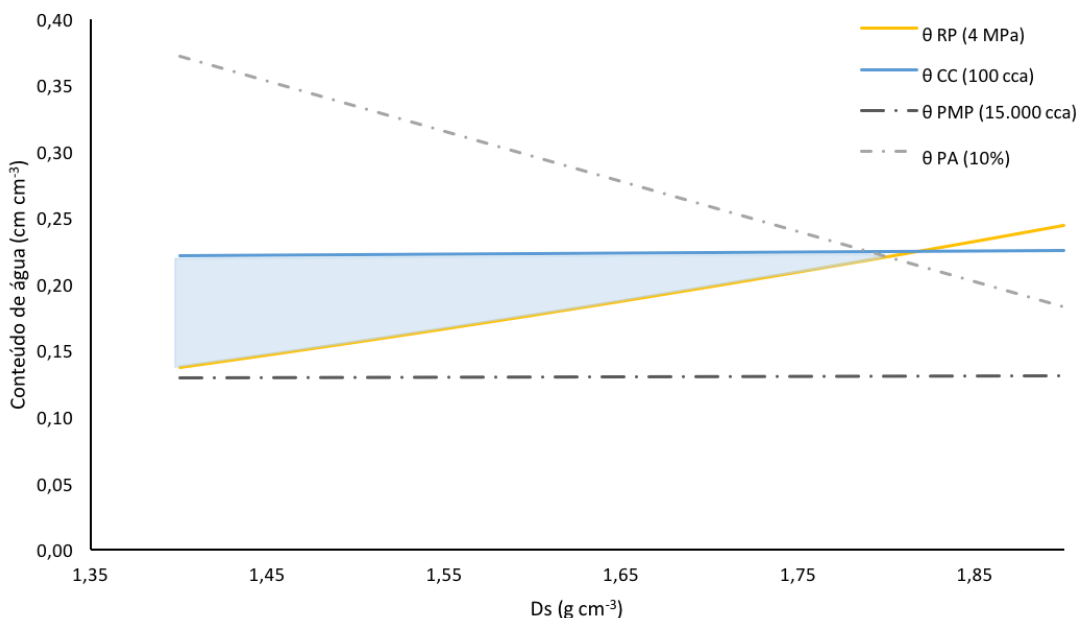


Figura 13. Modelagem da variação do conteúdo de água (θ) com a densidade do solo (D_s) nos níveis críticos de θ_{CC} , θ_{PMP} , θ_{Ar} e θ_{RP} da camada superficial (0 – 30 cm) com preparo mecanizado no ARGISSOLO AMARELO distrocoeso. A área sombreada representa o IHO.

Nas Figuras supracitadas, pode-se observar que o IHO < AD em todas as Ds avaliadas. Isto evidencia a compactação do solo (Kaiser et al., 2009; Chen et al., 2014) e, portanto, que o preparo mecanizado no cultivo de cana-de-açúcar, embora, inicialmente, possa ter efeitos positivos na QFS, estas vantagens apenas prevalecem por curto prazo (Cherubin et al., 2016).

Estes resultados também enfatizam que a variação da Ds teve uma influência pouco acentuada sobre a θ_{CC} e θ_{PMP} e, portanto, na AD. Inclusive, refletem a pouca sensibilidade do conceito de AD para avaliação das possíveis mudanças estruturais produzidas pelo preparo do solo, diferentemente do IHO, como discutido mais adiante.

Concomitantemente, percebe-se um aumento na faixa de disponibilidade de água com o acréscimo nos valores de Ds, mostrando sua correlação positiva. Esta tendência também foi observada por da Silva et al. (1994) para solos de textura franco-arenosa. Diversos autores atribuem este comportamento às mudanças no meio poroso, pois com o aumento na Ds há um incremento na frequência das frações menores de poros, as quais retém água em maiores potenciais (Guedes Filho et al., 2013; Safadoust et al., 2014; Silva et al., 2015).

Nos dois tratamentos (SP e CP) as restrições no IHO foram definidas pela θ_{CC} (L_S) e θ_{RP} (L_I) até a Ds atingir o valor de $\approx 1,80 \text{ g cm}^{-3}$, no qual $\theta_{Ar} < \theta_{CC}$. Devido ao fato de que esta substituição no L_S teve lugar próximo ao ponto de densidade crítica (Dsc) no solo sem preparo e convergiu com a Dsc do solo com preparo, a θ_{Ar} não é considerada o maior fator limitante nesta camada.

Autores como Tormena et al. (1999) e Silva et al. (2011) coincidem em que a ocorrência $\theta_{Ar} > \theta_{CC}$ em altos valores de Ds sugere a presença de uma microestrutura estável, a qual preserva o espaço poroso necessário para realização das trocas de gases. Neste estudo, ainda é importante considerar a granulometria, pois a textura arenosa contribui na formação de poros maiores, favorecendo esta condição (Cameron & Buchan, 2006).

Por outro lado, o L_I do IHO foi, invariavelmente, representado pela θ_{RP} , constituindo a principal restrição nesta camada, para todos os valores de Ds avaliados. Em solos coesos, este comportamento pode ser explicado pelo grau de compactação, pobre estruturação, assim como pelos altos valores de Ds e stress efetivo (Dexter, 2004b; Silveira et al., 2010; de Lima et al., 2014).

Neste sentido, ainda com relação às Figuras 12 e 13, pode-se observar que em D_s e θ similares, a θ_{RP} foi maior no solo SP, quando comparado com seu análogo CP. Em contrapartida, os valores de θ_{CC} e θ_{PMP} foram menores no solo CP quando comparado com SP. Isto indica um maior nível de compactação do solo SP e, além disso, evidencia que a D_s avaliada isoladamente não indica a magnitude do efeito do preparo mecanizado em termos de melhoria da qualidade física do solo para o crescimento da cana-de-açúcar, pois esta quantificação apenas tornou-se possível a partir da verificação do comportamento do IHO em função da D_s .

Neste seguimento, verifica-se uma diminuição do IHO associada ao aumento na D_s . Como explicado por da Silva et al. (1994), esta diminuição decorre, principalmente, da maior influência da D_s na θ_{RP} e θ_{Ar} do que nos potenciais matriciais limitantes (θ_{CC} e θ_{PMP}). Isto corrobora que o IHO apresentou maior sensibilidade para avaliar as mudanças estruturais na camada coesa em estudo quando comparado com o conhecido conceito de AD.

Outro valor relevante no estudo da relação entre D_s e IHO corresponde à D_{sc} , pois neste ponto, há uma convergência entre o L_s e L_i , tendo como resultado um IHO = 0 (nulo). Esta equivalência representa um meio físico hostil para o crescimento e desenvolvimento das plantas e, portanto, que compromete notavelmente a produtividade da cana-de-açúcar.

Na Figura 14, são apresentadas graficamente as variações do IHO em função da D_s , bem como as D_{sc} para cada tratamento, com valores correspondentes a $1,82 \text{ g cm}^{-3}$ (SP) e $1,80 \text{ g cm}^{-3}$ (CP).

Na referida figura, pode-se observar que a D_s afetou de forma similar, porém em distintas magnitudes cada tratamento. Os maiores valores de IHO corresponderam a $0,084$ (CP) e $0,062 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (SP), com ocorrência em D_s similares, i.e., $\approx 1,4 \text{ g cm}^{-3}$. A medida que os valores de D_s aumentam, percebe-se uma acentuada influência da D_s no IHO do solo CP relacionada ao marcante acréscimo nos valores de θ_{RP} neste tratamento. Por este motivo, o IHO do solo CP foi maior apenas nas D_s entre $\approx 1,40$ e $1,65 \text{ g cm}^{-3}$ (D_s média). A partir da $D_s = 1,65 \text{ g cm}^{-3}$, o solo SP apresentou os maiores valores de IHO. Estes resultados coincidem com os apresentados por Tormena et al. (1999).

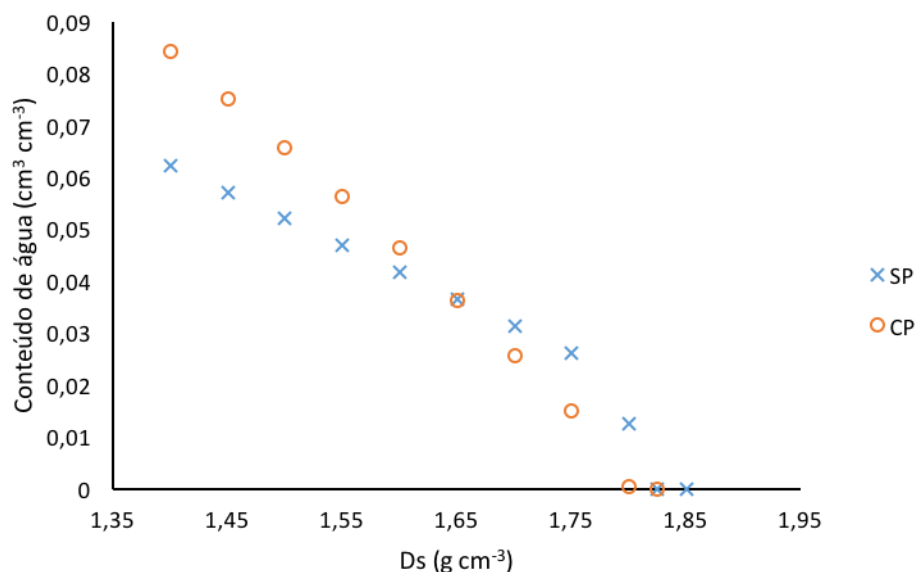


Figura 14. Variação do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) com a densidade do solo (D_s), nos tratamentos com e sem preparo mecanizado.

Com base nas evidências apresentadas nesta pesquisa, este comportamento pode ser associado à redistribuição dos poros, pois no tratamento SP, a menor movimentação do solo favoreceu à retenção de água (maior frequência de microporos), bem como à preservação e, possivelmente, acréscimo da macroporosidade (Figura 5) — como mencionado anteriormente, promovido, provavelmente, por uma progressiva produção de bioporos e pelo arranjo de seus agregados (Kay & VandenBygaart, 2002; Klein & Libardi, 2002).

Entre os tratamentos avaliados, verifica-se que no solo SP aproximadamente 98% das amostras coletadas apresentaram $D_s < D_{sc}$, enquanto que no solo CP este valor aumentou para 100% (Figura 15).

Estes resultados indicam que em ambos tratamentos as condições físicas são próprias para a produção agrícola, mas apenas quando os níveis de umidade estiverem dentro dos limites do IHO.

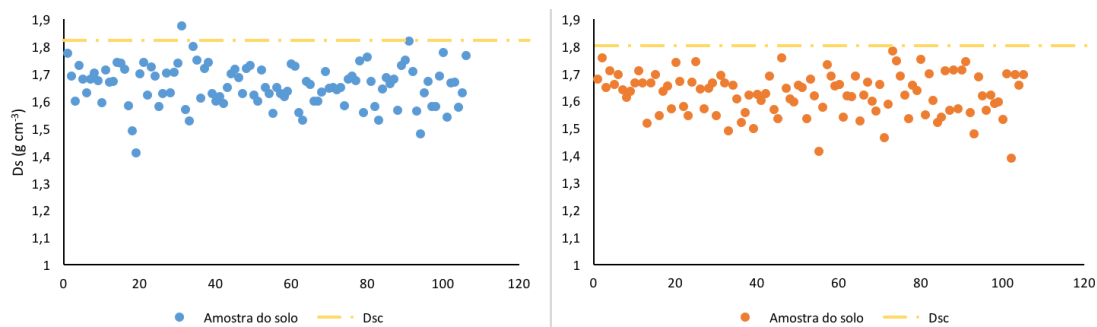


Figura 15. Densidade do solo (D_s) e densidade crítica (D_{sc}) correspondente às amostras com estrutura preservada coletadas na camada superficial (0 – 30 cm) do solo em estudo SP e CP.

Para confirmar esta condição e verificar a tendência da principal restrição do IHO *in situ*, a RP também foi avaliada em campo. As condições do solo foram semelhantes para ambos tratamentos, isto é, valores médios de D_s entre $\approx 1,4 - 1,9 \text{ g cm}^{-3}$ e $\theta_{\text{atual}} \approx 0,17 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.

Na Figura 16 são apresentados graficamente os resultados da avaliação da RP *in situ* na camada superficial do solo (0 – 30 cm) para cada tratamento. De forma geral, ambos tratamentos apresentam valores médios de RP < 4 MPa e PA $\geq 10\%$ (considerados como críticos neste estudo). Não obstante, os maiores valores de RP correspondem ao solo sem preparo e, portanto, o menor IHO também. Isto indica o predomínio de valores de $D_s < D_{sc}$ na camada em estudo, pois $IHO > 0$.

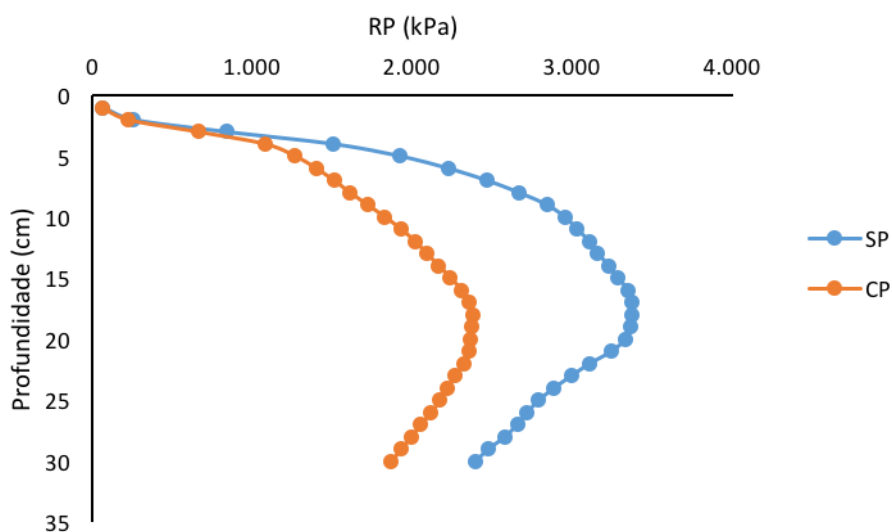


Figura 16. Resistência do solo à penetração determinada em campo na camada superficial (0 – 30 cm), com e sem manejo mecanizado.

Assim, os resultados em campo corroboram a tendência observada no IHO determinado em laboratório, bem como aptidão agrícola da camada em estudo.

Por conseguinte, pode-se afirmar que o preparo do solo aumentou o IHO na camada coesa, apresentando valores médios correspondentes a 0,055 (CP) e 0,041 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ (SP), ou seja $\approx 7,5\%$.

Esta afirmação coincide com as observações de autores como Pacheco & Cantalice (2011b), pois concluíram que o cultivo com cana-de-açúcar aumentou o IHO do horizonte superficial de um ARGISSOLO AMARELO distrocoeso dos Tabuleiros Costeiros do Estado de Alagoas, Brasil.

5.2.4 Integral Water Capacity

Considerando que as variações no mundo físico tendem a ocorrer continuamente, ao invés de por meio de transições abruptas (Rogawski, 2009), o *Integral Water Capacity* (Groenevelt et al., 2001) utiliza funções contínuas para estimar diversas restrições no cálculo da disponibilidade hídrica do solo, contrastando com abordagens, como o IHO, que utilizam funções descontínuas.

As restrições consideradas para determinação do IWC neste estudo foram três: i) escassez de aeração; ii) alta condutividade hidráulica; e iii) resistência do solo à penetração. Neste sentido, cabe mencionar que a camada em estudo possui características de acidez elevada e comportamento *hardsetting*, motivo pelo qual as restrições que consideram o potencial osmótico (Groenevelt et al., 2004) e a baixa condutividade hidráulica (Groenevelt et al., 2001) não foram relevantes.

Para o cálculo do IWC foram determinados, a partir dos dados obtidos experimentalmente, os modelos correspondentes à CRP (power model) e CRA (van Genuchten, 1980), cujos ajustes (Tabela 5) explicaram 97% da variação nos valores de RP, bem como 98 (SP) e 99% (CP) nos de θ , respectivamente (Tabela 7).

Tabela 7. Coeficientes de determinação dos modelos CRP e CRA para o IWC.

Tratamento	CRP	R ² (adj)	CRA	R ² (adj)
SP	$SR(h) = \alpha h^b$	0,97	$\theta = (\theta_s - \theta_r)[1 + (\alpha h)^n]^{-m} + \theta_r$	0,98
CP		0,97		0,99

Na Figura 17 se apresenta graficamente a CRP (power model), nos valores de Ds médios, isto é, $\approx 1,63$ (CP) e $1,65 \text{ g cm}^{-3}$ (SP). De forma geral, pode-se observar, indistintamente, um acentuado incremento na RP à medida que a θ diminui. Valores ligeiramente superiores correspondem ao solo SP.

A partir da CCRAS (van Genuchten, 1980) foi calculada a *differential water capacity* (C(h)), ambas apresentadas na Figura 18.

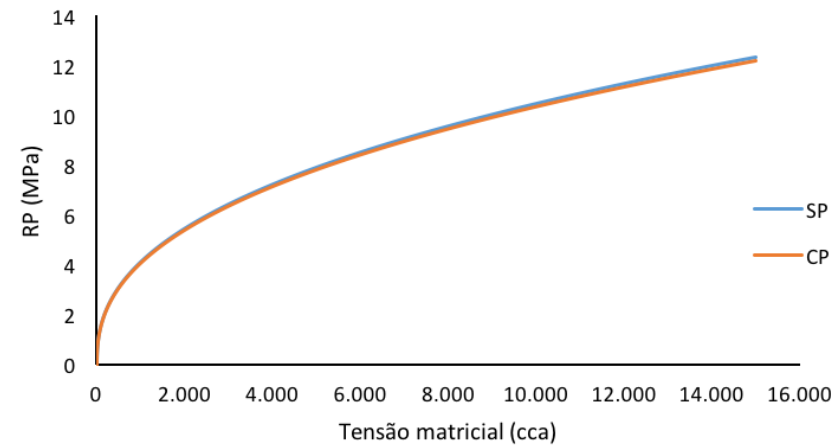


Figura 17. Curva de resistência do solo à penetração (power model) da camada superficial (0 – 30 cm), nos tratamentos SP e CP.

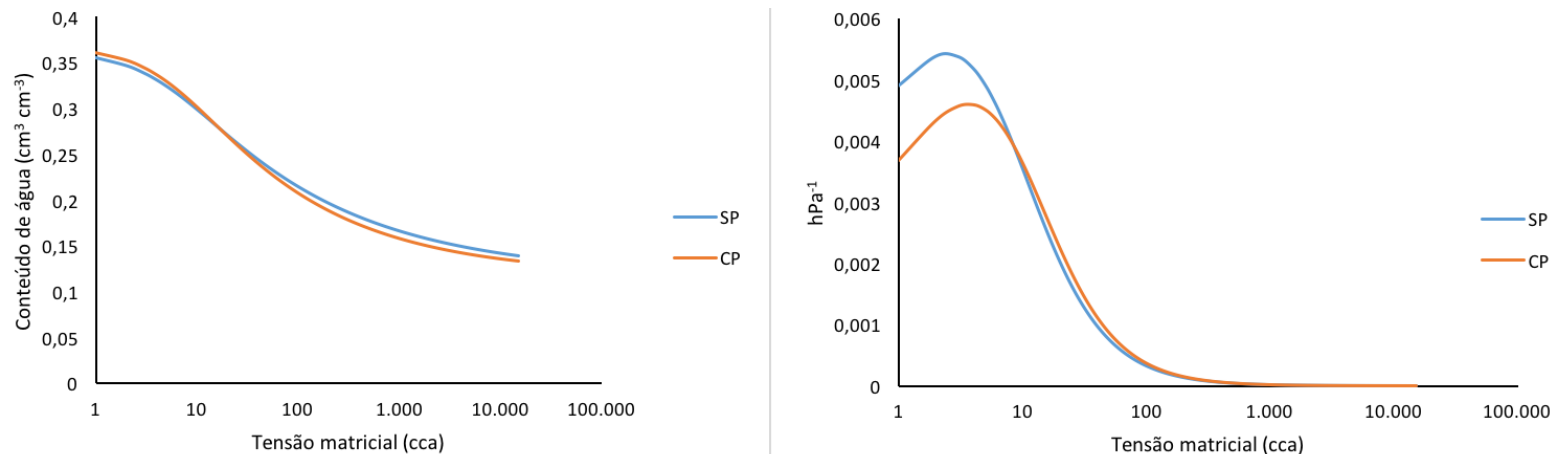


Figura 18. CCRAS (van Genuchten, 1980) e *Differential Water Capacity* (C(h)) da camada superficial (0 – 30 cm), nos tratamentos SP e CP.

Após a determinação da $C(h)$ e as diferentes funções $E_i(h) = \omega(h) C(h)$, o cálculo do IWC para os tratamentos SP e CP foi realizado a partir das equações integrais 27 e 28, respectivamente. Para o solo SP e CP, estas funções também se encontram representadas graficamente nas Figuras 19 e 20, na devida ordem.

$$IWC_{sp} = \int_{20}^{66} E_{ka}(h)dh + \int_{66}^{330} E_k(h)dh + \int_{330}^{450} C(h)dh + \int_{450}^{910} E_r(h)dh = 0,0387 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3} \quad (27)$$

$$IWC_{sp} = 0,02410 + 0,01318 + 0,00075 + 0,00071 = 0,0387 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$$

$$IWC_{cp} = \int_{19}^{56} E_{ka}(h)dh + \int_{56}^{330} E_k(h)dh + \int_{330}^{460} C(h)dh + \int_{460}^{930} E_r(h)dh = 0,0370 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3} \quad (28)$$

$$IWC_{cp} = 0,01594 + 0,01944 + 0,00086 + 0,00075 = 0,0370 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$$

Os cálculos (equações 27 e 28) indicam que na camada coesa em estudo, a escassez de aeração restringe, totalmente, a disponibilidade de água para a cana-de-açúcar, pois em $h < 19$ (CP) e 20 cca (SP) a $PA < 10\%$, respectivamente (Figuras 19 e 20).

Neste segmento de potenciais (h), na *differential water capacity* (Figura 18 a 20) pode-se observar que inicialmente (i.e., $h \leq 8,5$ cca) o solo SP drena um maior volume de água por unidade de h , confirmando uma maior frequência de macroporos. Em contrapartida, esta situação se inverte em $h \geq 8,5$ cca ratificando maior frequência de mesoporos no solo CP em potenciais entre os intervalos $10 < h < 19$ cca.

Estes resultados confirmam que o preparo do solo não favoreceu a formação de macroporos, mas promoveu uma descompactação da camada coesa. Além disso, percebe-se que a textura arenosa e, possivelmente, a contínua formação de bioporos contribuem a manter as condições de aeração nesta camada, pois ambos tratamentos atingem 10% de PA em potenciais similares (i.e., $h \approx 20$ cca).

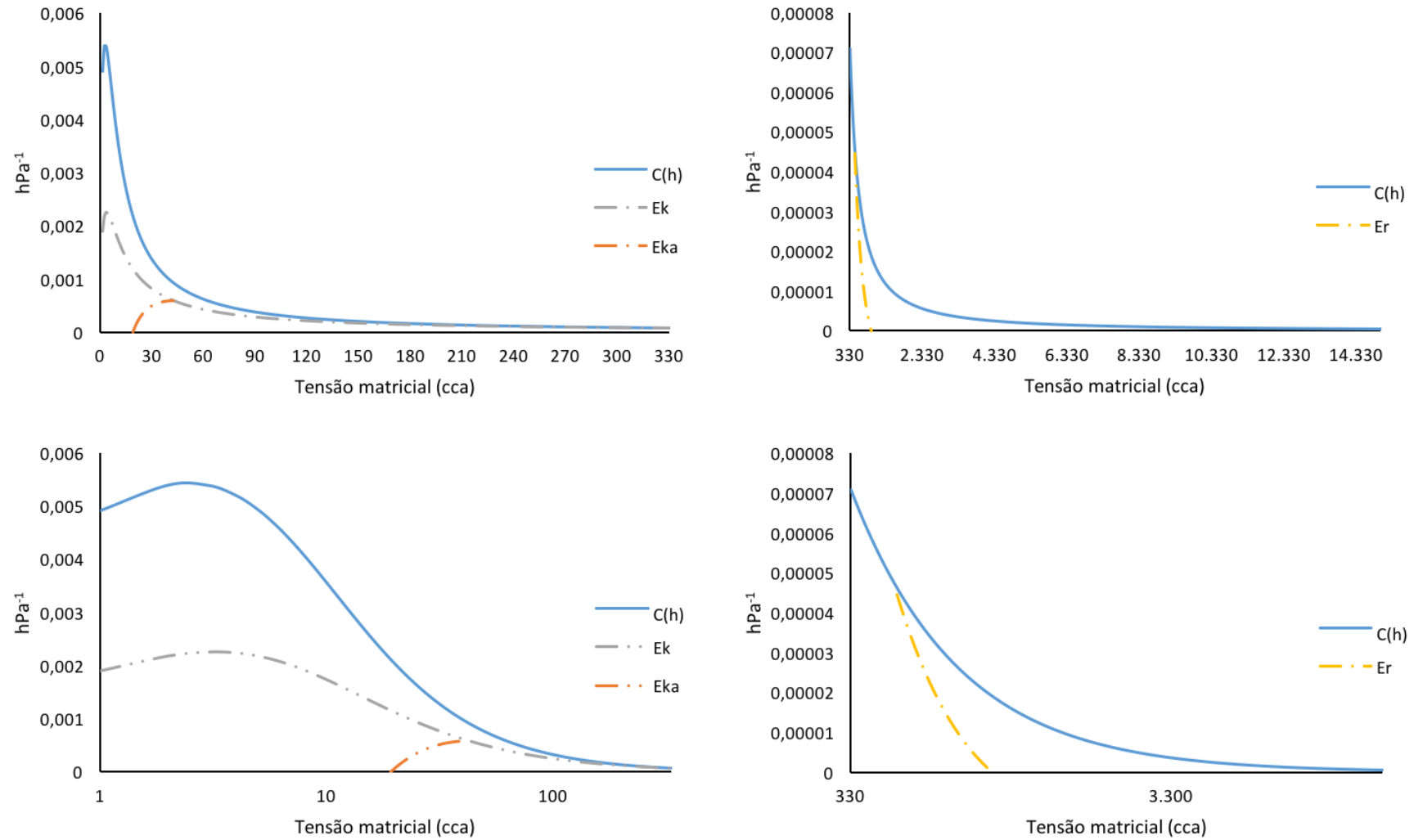


Figura 19. *Differential water capacity* ($C(h)$) e *effective differential water capacities* ($E_i(h)$) na D_s média ($\approx 1,65 \text{ g cm}^{-3}$) do solo sem preparo mecanizado.

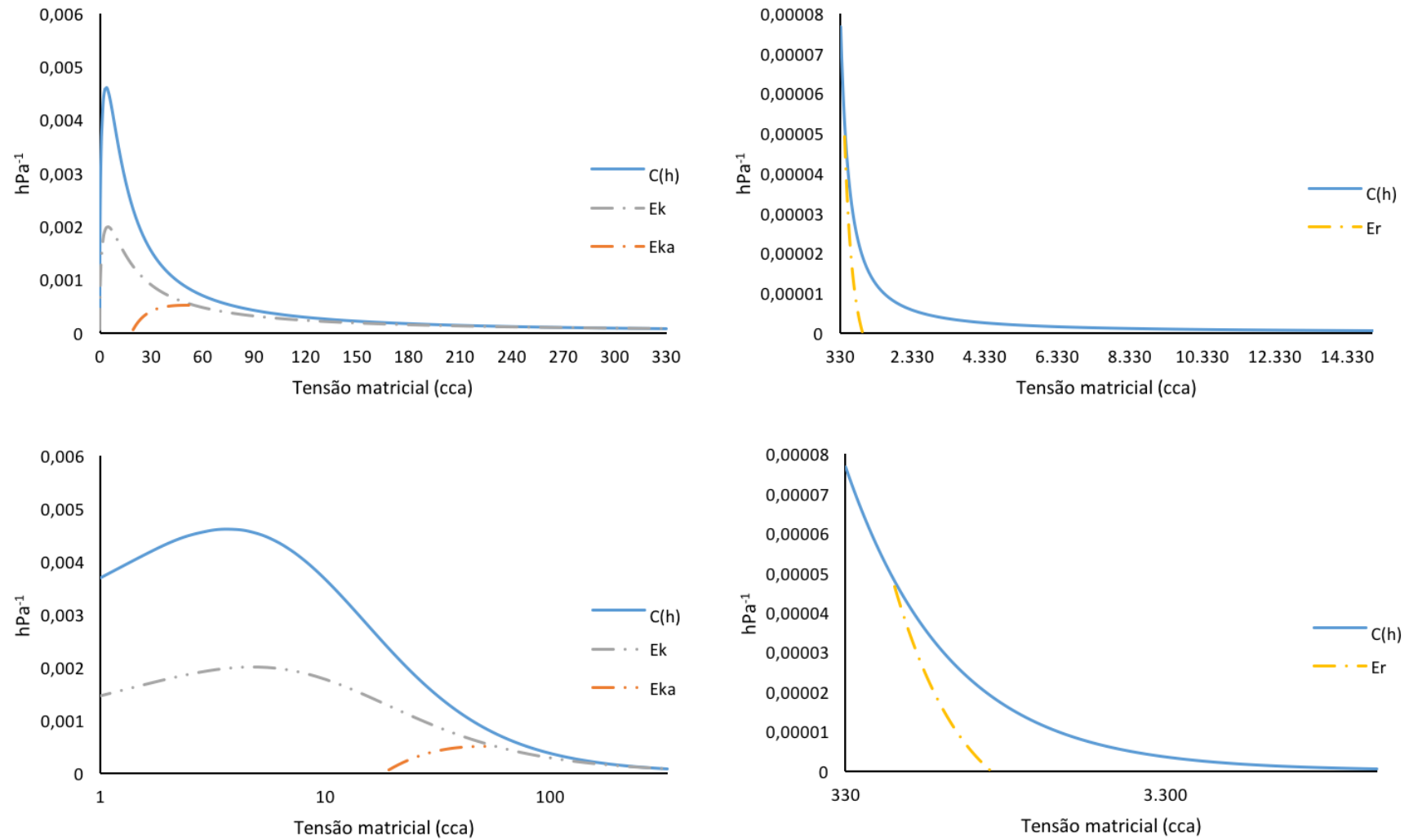


Figura 20. *Differential water capacity ($C(h)$) e effective differential water capacities ($E_i(h)$) na D_s média ($\approx 1,63 \text{ g cm}^{-3}$) do solo com preparo mecanizado.*

Na sequência, verifica-se que entre os potenciais de 19 (CP) e 20 cca (SP) $< h < 56$ (CP) e 66 cca (SP) os altos valores de condutividade hidráulica, bem como a escassez de aeração, reduzem de maneira conjunta a disponibilidade hídrica do solo (Figuras 19 e 20).

Entretanto, é importante salientar que ainda após as reduções e mesmo retida em potenciais (h) substancialmente menores que 100 cca (valor utilizado em outros parâmetros como L_s), esta fração de umidade representa $\approx 62,3$ (SP) e 43,1% (CP) da água considerada, nesta abordagem, como disponível.

As menores percentagens apresentadas pelo solo CP, possivelmente, decorrem de sua maior P_T ($p < 0,05$) e sua redistribuição, pois os resultados indicam que atinge uma $PA = 15\%$ drenando mais poros em menores potenciais (h), o que também corrobora sua maior condutividade hidráulica ($p < 0,05$).

No caso do solo SP, percebe-se a necessidade de drenar uma pequena fração dos microporos de maior tamanho para atingir um valor de $PA = 15\%$, no qual esta restrição deixa de ser relevante.

Prosseguindo com as restrições, depois dos potenciais de 56 (CP) e 66 cca (SP) $< h < 330$ cca apenas a elevada condutividade hidráulica torna indisponível uma fração de água do solo. A percentagem de água considerada como disponível neste intervalo, corresponde a 34 % para o solo SP e 52 %, no solo CP.

Estes resultados corroboram a maior frequência de mesoporos e microporos de maior tamanho no solo CP, bem como uma maior influência da restrição correspondente a elevada condutividade hidráulica sobre este tratamento.

Na camada em estudo esta condição pode ser inconveniente, uma vez que, principalmente, em sistemas de produção agrícola não irrigados a preservação de umidade na profundidade efetiva do sistema radicular resulta de fundamental importância. Além do mais, em solos com comportamento hardsetting a RP aumenta acentuadamente à medida que o solo seca (Silveira et al., 2010). Esta secagem ocasiona na planta diversos tipos de stress (Gubiani et al., 2013).

Pode-se perceber que nesta abordagem, entre 96,3 (SP) e 95,4% (CP) da água disponível, se encontra retida na faixa úmida da CCRAS ($h < 330$ cca) e com algum tipo de restrição física.

Neste seguimento, o modelo indica que na faixa de $330 < h < 460$ (CP) e 450 cca (SP) houve menos restrições físicas para a absorção de água. Sem embargo, apenas 1,8 (SP) e 2,3% (CP) da água disponível encontra-se retida entre estes potenciais.

A partir de 460 (CP) e 450 cca (SP) $< h < 930$ (CP) e 910 (SP) a resistência do solo à penetração foi o fator restritivo. Com percentagens de água disponível correspondentes a 1,84 (SP) e 2 % (CP).

A partir de $h = 330$ cca a quantidade de água disponível para as plantas foi bastante baixa, independentemente do tratamento (CP e SP).

Estes resultados mais uma vez salientam a importância de repensar a utilização arbitrária de limites fixos (frequentemente extrapolados) na avaliação da disponibilidade de água em solos coesos de textura arenosa em solos dos Tabuleiros Costeiros cultivados com cana-de-açúcar, como os aqui estudados.

Com valores de 0,0387 (SP) e 0,0370 cm cm^{-3} os resultados do IWC foram um pouco maiores do que os obtidos pelo IHO na D_s média (i.e., 1,65 g cm^{-3}). Neste sentido, Asgarzadeh et al. (2010) comentam que esta tendência se deve a escolha dos limites, bem como aos procedimentos para sua determinação.

5.2.5 Integral energy

Outro importante critério a ser levado em consideração na caracterização da disponibilidade hídrica do solo corresponde à quantificação da energia requerida pela cana-de-açúcar para retirar do solo uma unidade de água (J kg^{-1}) entre uma faixa de potencial mátrico definida. Esta avaliação foi possível a partir da E_i , conceito introduzido por Minasny & McBratney em 2003.

Nesta abordagem, embora o conteúdo de água no intervalo de disponibilidade seja similar em distintos tipos de solo ou, neste caso, no mesmo tipo de solo sob distintos manejos (SP e CP), diferentes energias de retenção podem diversificar a eficiência em sua utilização.

No presente estudo, a E_i foi determinada nas diferentes abordagens utilizadas para avaliação da disponibilidade hídrica do solo, isto é: i) Água disponível (AD); ii) Intervalo Hídrico Ótimo (IHO); e iii) Integral Water Capacity (IWC).

Os valores de E_i correspondentes a AD, IHO e IWC estão apresentados na Tabela 4, bem como representados graficamente na Figura 21.

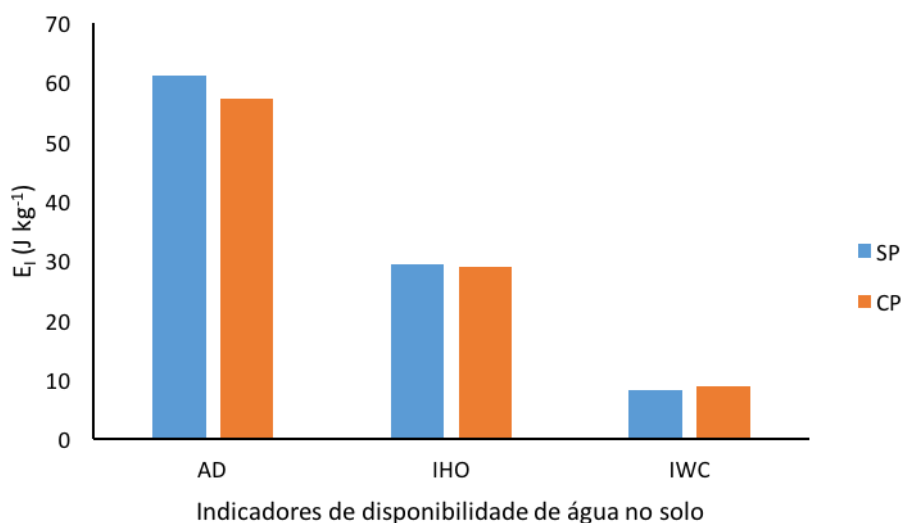


Figura 21. Integral energy da AD, IHO e IWC da camada superficial (0 – 30 cm) na Ds média do solo, com e sem preparo mecanizado.

De forma geral, o preparo do solo não influenciou a E_i nos diferentes parâmetros utilizados. Isto pode ser explicado, principalmente, pela relação deste parâmetro com a granulometria do solo e suas propriedades estruturais (e.g., Ds), pois, neste estudo, não se obteve evidência suficiente para afirmar que o preparo houvesse modificado as mesmas (Minasny & McBratney, 2003; Asgarzadeh et al., 2011).

Por outro lado, o IWC mostrou os menores valores de E_i indicando que a água disponível calculada utilizando este parâmetro, se encontra retida em potenciais (h) menores, concordando com as observações realizadas por Asgarzadeh et al. (2011). Colocando estes resultados em perspectiva, a E_i calculada para o IHO e AD foi ≈ 341 e 688% maior, respectivamente.

Isto sugere que, embora o preparo do solo não tenha favorecido a E_i entre os tratamentos, o IWC representa uma alternativa que considera frações de água disponível em intervalos de potencial mátrico favoráveis para a produção de cana-de-açúcar.

5.3 Biometria, produtividade e variáveis tecnológicas da cana-de-açúcar

Para verificar se o preparo mecanizado do solo contribuiu à produtividade da cana-de-açúcar no sistema de sequeiro, foram avaliados distintos parâmetros biométricos e diversas características agroindustriais (ou variáveis tecnológicas).

A precipitação total entre julho de 2014 e novembro de 2015 foi de aproximadamente 1.143,1 mm. Na Figura 22 também pode-se observar a precipitação mensal, bem como a média diária durante o ciclo de cultivo.

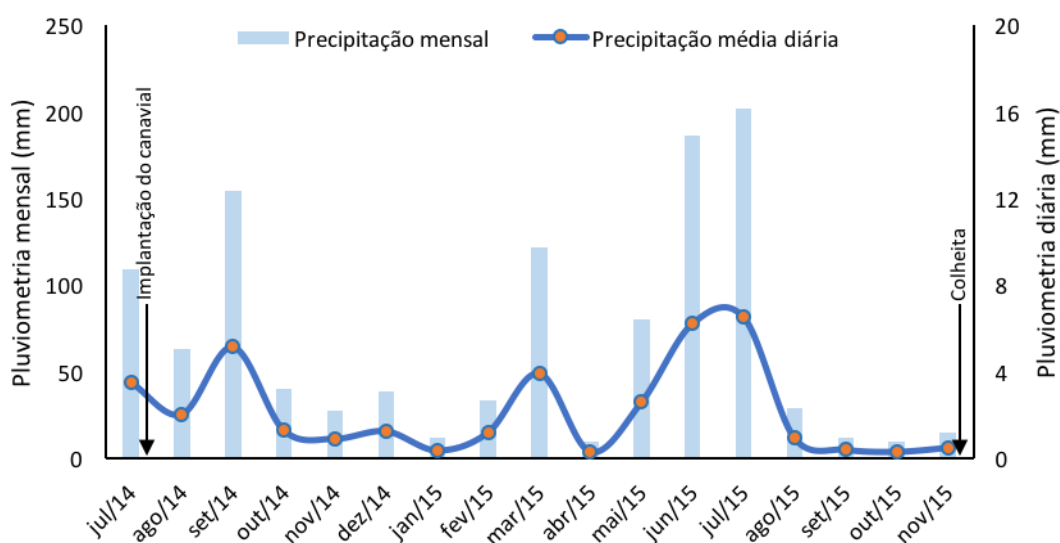


Figura 22. Pluviometria mensal e média diária durante o ciclo de cultivo julho 2014 – novembro 2015.

Nas Tabelas 8 e 9 estão apresentados os resultados dos parâmetros biométricos e a produtividade da cana-de-açúcar, assim como as variáveis tecnológicas para cada tratamento, respectivamente.

De modo geral, não se obteve evidência suficiente de que o preparo do solo tenha influenciado parâmetros biométricos como diâmetro de colmo, altura de colmo e perfilhamento, tampouco houve diferença na produtividade ($p > 0,05$).

Estes resultados coincidem com os de Oliveira et al. (2011), pois não reportaram diferenças na produtividade de colmos no cultivo de cana-de-açúcar sem irrigação em um solo similar em Carpina no Estado de Pernambuco, Brasil.

Tabela 8. Biometria e produtividade da cana-de-açúcar com e sem preparo mecanizado do solo.

	Crescimento e produtividade da cana-de-açúcar							
	Diâmetro		Altura		Perfilhos		Produtividade	
	mm		cm		plantas m ⁻¹		Mg ha ⁻¹	
	SP	CP	SP	CP	SP	CP	SP	CP
Média	24,85 a1	24,85 a1	0,97 a1	1,04 a1	8,96 a1	9,23 a1	95,4 a1	99,07 a1
F	0,00		1,49		1,11		0,28	
P	0,9976		0,2684		0,3322		0,61	
C. V. (%)	4,71		7,51		3,92		9,81	

Médias seguidas por letras e números iguais não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey.

Tabela 9. Variáveis tecnológicas da cana-de-açúcar com e sem preparo mecanizado do solo.

	Variáveis tecnológicas da cana-de-açúcar									
	Sólidos solúveis		Pureza		PC		Fibra		ATR	
	°Brix				%				Kg Mg ⁻¹	
	SP	CP	SP	CP	SP	CP	SP	CP	SP	CP
Média	20 a1	20 a1	86,2 a1	85,8 a1	14,7 a1	14,8 a1	13,7 a1	14,2 a1	143,8 a1	143,1 a1
F	0,31		0,45		0,101		2,91		0,67	
P	0,5968		0,5260		0,7613		0,1388		0,8047	
C. V. (%)	2,23		0,93		3,29		3,10		2,85	

Médias seguidas por letras e números iguais não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey.

Uma possível explicação é que, no regime de sequeiro, a permanência do conteúdo de água dentro dos limites da IWC e IHO está em função das condições meteorológicas predominantes durante o crescimento da cana-de-açúcar.

Além disso, as necessidades hídricas da cana-de-açúcar variam conforme as fases de desenvolvimento, autores como da Silva et al. (2012) detalham estas informações para a variedade RB92579 no Estado da Bahia e reportam requerimentos hídricos de 1.710 mm durante o ciclo de produção, com uma média de evapotranspiração equivalente a 4,7 mm dia⁻¹.

Tomando estes valores como referência, a precipitação durante o ciclo produtivo foi 33,15% menor e apresentou uma distribuição irregular, não atendendo as exigências da cana-de-açúcar (Figura 22).

Estes dados, associados com a baixa capacidade de retenção de água mostrada pela camada em estudo, sugerem que, possivelmente, a cana-de-açúcar esteve frequentemente submetida a stress hídrico e mecânico — devido ao comportamento hardsetting —, o que limitou sua produtividade.

Adicionalmente, como bem apontam Gubiani et al. (2013), em escala de campo, a exclusiva avaliação do efeito dos atributos físicos do solo na resposta das plantas constitui um grande desafio, devido a influência de inúmeros fatores cujos efeitos não são controlados, por exemplo: pragas, doenças, nutrientes, radiação solar, etc.

Com relação aos atributos tecnológicos, não houve diferença para °Brix, Pureza, PC, Fibra e ATR entre os sistemas de manejo (SP e CP). Este resultado, possivelmente, decorre da influência de vários fatores sobre referidos atributos, entre os habitualmente mencionados na literatura se encontram: genética do cultivar, temperatura, fertilidade do solo, umidade do solo, estágio de maturação, ciclo de colheita (ambientes contrastantes), estado sanitário e condições de conservação dos colmos, entre outros (Melo et al., 2009; Santos, et al., 2011; de Oliveira et al., 2011; Marafón, 2012).

6 Considerações Finais

A avaliação do preparo mecanizado do solo no cultivo da cana-de-açúcar em regime de sequeiro, a partir de distintas abordagens, possibilitou ampliar o discernimento sobre a influência do preparo mecanizado na qualidade física de um solo com comportamento hardsetting.

Os resultados obtidos durante esta pesquisa indicaram que as possíveis vantagens da utilização do preparo mecanizado do solo no cultivo da cana-de-açúcar são amplamente discutíveis, pois cabe à comunidade científica da região canavieira do Estado de Pernambuco chegar a consensos (sustentados experimentalmente) para definir os critérios que serão levados em consideração para determinar uma melhora na qualidade física do solo para o crescimento da cana-de-açúcar.

Certamente, isto implica considerar de forma integrada as propriedades intrínsecas e dinâmicas dos solos da região, bem como a correlação dos atributos físicos do solo com o potencial de resposta da cana-de-açúcar.

Dentre os modelos utilizados, o IHO mostrou ser mais sensível para avaliar a influência do preparo mecanizado na qualidade física do solo para o crescimento da cana-de-açúcar. O IWC aportou uma abordagem flexível e crítica para caracterizar a disponibilidade hídrica, pelo qual se recomenda sua utilização em substituição do popular conceito de AD em solos coesos da região canavieira do Estado de Pernambuco.

Considerando os resultados obtidos, torna-se, especialmente, necessária a realização de pesquisas que objetivem calibrar tais indicadores para condições regionais (i.e., solos e variedades de cana), pois como advertido por seus autores, o sucesso (utilidade) dos mesmos está sujeito à relação entre os valores críticos e o potencial de resposta das plantas, neste caso a cultura da cana-de-açúcar.

Frequentemente, estes limites, constituem-se a partir de extrapolações arbitrárias; inclusive de valores letais como o PMP, sendo uma restrição pouco conveniente e que não representa os interesses agrônômicos em sistemas agrícolas sustentáveis, pois neste caso, não basta manter a cana-de-açúcar com vida, mas também suprir seu requerimento hídrico para estimular a expressão

de seu potencial produtivo. Estas considerações aplicam para outras restrições como a RP.

Por outro lado, considerando que não se obteve evidencia de que o preparo mecanizado do solo tenha influenciado alguns fatores que contribuem substancialmente com o comportamento hardsetting (i.e., altos valores D_s e stress efetivo), práticas que promovam à conservação de água na profundidade efetiva do solo, bem como a sua agregação, poderiam ajudar na atenuação deste comportamento, como já tem sido reportado na literatura.

7 Conclusões

1. Após 17 meses de sua realização, não se obteve evidencia de que o preparo mecanizado do solo tenha favorecido propriedades estruturais como D_s e agregação (DMP e DMG).
2. O preparo mecanizado descompactou a camada superficial do solo, propiciando um acréscimo na porosidade total e consequente modificação de sua distribuição.
3. O preparo mecanizado promoveu um aumento na condutividade hidráulica saturada do solo, o que diminuiu sua capacidade de armazenagem, comprometendo a disponibilidade hídrica para a cana-de-açúcar e aumentando seu comportamento hardsetting.
4. O preparo mecanizado ampliou o IHO da camada superficial (0 – 30 cm) de um ARGISSOLO AMARELO distrocoeso cultivado com cana-de-açúcar.
5. A θ_{RP} representou a principal restrição física do ARGISSOLO AMARELO distrocoeso para o crescimento da cana-de-açúcar.
6. O preparo mecanizado do solo não influenciou a E_i nos diferentes indicadores de qualidade física utilizados (AD, IHO e IWC).

7. O preparo mecanizado do solo não influenciou a produtividade da cana-de-açúcar nem sua qualidade.

8 Bibliografia

- Almeida, B. G. (2008). Tese. *Métodos alternativos de determinação de parâmetros físicos do solo e uso de condicionadores químicos no estudo da qualidade do solo*. São Paulo, Piracicaba, Brasil. Acesso em 30 de janeiro de 2017, disponível em www.teses.usp.br
- Andrade, M. C. (2001). Espaço e tempo na agroindústria canavieira de Pernambuco. *Estudos Avançados*, 15, 267-280.
- APAL. (2013). Agricultural Laboratory. *Soil Test Interpretation Guide*.
- Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M. R., & Nikbakht, A. M. (2014). SAWCal: A user-friendly program for calculating soil available water quantities and physical quality indices. *Computers and Electronics in Agriculture*, 109, 86-93.
- Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M. R., Dexter, A. R., Mahboubi, A. A., & Neyshabouri, M. R. (2014). Determination of soil available water for plants: consistency between laboratory and field measurements. *Geoderma*, 226, 8-20.
- Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M. R., Mahboubi, A. A., Nosrati, A., & Dexter, A. R. (2010). Soil water availability for plants as quantified by conventional available water, least limiting water range and integral water capacity. *Plant and soil*, 335, 229-244.
- Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M. R., Mahboubi, A. A., Nosrati, A., & Dexter, A. R. (2011). Integral energy of conventional available water, least limiting water range and integral water capacity for better characterization of water availability and soil physical quality. *Geoderma*, 166, 34-42.
- Bengough, A. G., Campell, D. J., & O'Sullivan, M. (2001). Penetrometer techniques in relation to soil compaction and root growth. Em *Soil and environmental analysis : physical methods* (pp. 377-403). New York: Smith, K.A., Mullins, C.E.
- Bissonnais, Y. L. (1996). Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of soil science*, 47, 425-437.

- Bissonnais, Y. L. (2006). Aggregate breakdown mechanisms and erodibility. Em R. Lal, *Encyclopedia of Soil Science* (Vol. 2, pp. 40-44). CRC Press.
- Bouma, J. (1977). Soil survey papers. *Soil survey and the study of water in unsaturated soil*, 13, 107. Wageningen, Netherlands: Soil Survey Institute.
- Briggs, L. J. (1897). *The mechanics of soil moisture*. USDA Bureau of Soils Bull. 10. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC.
- Briggs, L. J., & McLane, J. W. (1907). *Moisture equivalents of soils*. USDA Bureau of Soils Bull. 45. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC.
- Briggs, L. J., & Shantz, H. L. (1911). A wax seal method for determining the lower limit of available soil moisture. *Botanical Gazette*, 210-219.
- Briggs, L. J., & Shantz, H. L. (1912). The wilting coefficient and its indirect determination. *Botanical Gazette*, 20-37.
- Bronick, C. J., & Lal, R. (2005). Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124, 3-22.
- Buckingham, E. (1907). *Studies on the movement of soil moisture*. USDA Bureau of Soils Bull. 38. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC.
- Busscher, W. J. (1990). Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. *Transactions of the ASAE*, 33, 519-524.
- Cameron, K. C., & Buchan, G. D. (2006). Porosity and pore size distribution. Em R. Lal, *Encyclopedia of Soil Science* (Vol. 2, pp. 1350-1353). CRC Press.
- Carter, M. R., Gregorich, E. G., Anderson, D. W., Doran, J. W., Janzen, H. H., & Pierce, F. J. (1997). Concepts of soil quality and their significance. *Developments in Soil Science*, 25, 1-19.
- Carter, M. R., Gregorich, E. G., Anderson, D. W., Doran, J. W., Janzen, H. H., & Pierce, F. J. (1997). Concepts of soil quality and their significance. *Developments in Soil Science*, 1-19.
- Cass, A., Gusli, S., & MacLeod, D. A. (1994). Sustainability of soil structure quality in rice paddy—soya-bean cropping systems in South Sulawesi, Indonesia. *Soil and Tillage Research*, 31, 339-352.
- Castro Filho, C. D., Muzilli, O., & Podanoschi, A. L. (1998). Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 22, 527-538.

- Cavalcanti. (1998). *Recomendações de adubação para o estado de Pernambuco (2ª aproximação)*. Recife, Brasil: Instituto de Pesquisa Agropecuária de Pernambuco.
- Cecagno, D., de Andrade, S. E., Anghinoni, I., Kunrath, T. R., Martins, A. P., Reichert, J. M., . . . de Faccio Carvalho, P. C. (2016). Least limiting water range and soybean yield in a long-term, no-till, integrated crop-livestock system under different grazing intensities. *Soil and Tillage Research*, 156, 54-62.
- Chan, K. Y., & Sivapragasam, S. (1996). Amelioration of a degraded hardsetting soil using an anionic polymeric conditioner. *Soil Technology*, 9, 91-100.
- Chen, G., Weil, R. R., & Hill, R. L. (2014). Effects of compaction and cover crops on soil least limiting water range and air permeability. *Soil and Tillage Research*, 136, 61-69.
- Cherubin, M. R., Karlen, D. L., Franco, A. L., Tormena, C. A., Cerri, C. E., Davies, C. A., & Cerri, C. C. (2016). Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. *Geoderma*, 267, 156-168.
- CIB. (2009). *Conselho de Informações sobre Biotectologia*. Acesso em 20 de março de 2015, disponível em CIB: http://cib.org.br/wp-content/uploads/2011/10/guia_cana.pdf
- Cintra, F. L., & Libardi, P. L. (1998). Caracterização física de uma classe de solo do ecossistema do tabuleiro costeiro. *Scientia Agricola*, 55, 367-378.
- Cintra, F. L., de Mello, I. W., da Silva, L. V., & de Leal, M. L. (2006). Embrapa - Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 12. *Distribuição das raízes de cana-de-açúcar em sistemas e cultivo com adubação orgânica e Crotalaria spectabilis*, 20. Aracaju.
- CNA. (2014). *CNA Brasil - Confederação da Agricultura e Pecuária*. Acesso em 17 de março de 2015, disponível em CNA: http://www.canaldoprodutor.com.br/sites/default/files/ativos_CANA_9.pdf
- CONAB. (2014). *Companhia Nacional de Abastecimento*. Acesso em 17 de março de 2015, disponível em Conab: http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14_12_19_09_02_49_boletim_cana_portugues_-_3o_lev_-_2014-15.pdf

- Corey, A. T., & Klute, A. (1985). Application of the potential concept to soil water equilibrium and transport. *Soil Science Society of America Journal*, 49, 3-11.
- Corrêa, M. M., Ker, J. C., Barrón, V., Torrent, J., Curi, N., & Torres, T. C. (2008). 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*, 32, 297-313.
- Costa, E. A., Goedert, W. J., & Sousa, D. D. (2006). Qualidade de solo submetido a sistemas de cultivo com preparo convencional e plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 41, 1185-1191.
- CPRM/PRODEEM. (2005). Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea. Diagnóstico do município de Carpina, estado de Pernambuco. 11.
- da Costa, D. B. (2014). Adubação fosfatada em cana planta e soca em ARGISSOLOS do Nordeste de diferentes texturas. *Revista Caatinga*, 27, 47-56.
- da Rocha, A. T. (2008). Emprego do gesso do Araripe na melhoria do ambiente radicular da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 3, 307-312.
- da Silva, A. J., Cabeda, M. S., de Carvalho, F. G., & Lima, J. F. (2006). Alterações físicas e químicas de um Argissolo amarelo sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 10, 76-83.
- da Silva, A. O. (2014). Classificação climática de Thornthwaite e sua aplicabilidade agroclimatológica nos diferentes regimes de precipitação em Pernambuco. *Irriga*, 19, 46.
- da Silva, A. P., Kay, B. D., & Perfect, E. (1994). Characterization of the least limiting water range of soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58, 1775-1781.
- da Silva, A. P., Kay, B. D., Tormena, C. A., & Imhoff, S. (2006). Least Limiting Water Range of Soils. Em R. Lal, *Encyclopedia of soil science* (Vol. 2 , pp. 1026-1029). CRC Press.

- da Silva, E. M., Lima, J. E., de Azevedo, J. A., & Rodrigues, L. N. (2006). Valores de tensão na determinação da curva de retenção de água de solos do Cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 41, 323-330.
- da Silva, T. G., de Moura, M. S., Zolnier, S., Soares, J. M., Vieira, V. J., & Júnior, W. G. (2012). Requerimento hídrico e coeficiente de cultura da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro¹. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental*, 16, 64-71.
- Dane, J. H., Jalbert, M., & Hopmans, J. W. (2006). Hydraulic conductivity. Em R. Lal, *Encyclopedia of Soil Science* (Vol. 2, pp. 842-845). CRC Press.
- Daniells, I. G. (2012). Hardsetting soils: a review. *Soil Research*, 50, 349-359.
- Davidson, D. T. (1965). Penetrometer Measurements. Em *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling* (pp. 472-484). Black, C. A., Evans, D. D., White, J. L., Ensminger, L. E., Clark, F. E.
- de Jong van Lier, Q. (2014). Revisiting the S-index for soil physical quality and its use in Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38, 1-10.
- de Jong van Lier, Q., & Gubiani, P. I. (2015). Beyond the “Least Limiting Water Range”: Rethinking soil physics research in Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 39, 925-939.
- de Lima, H. V., da Silva, Á. P., Giarola, N. F., & Imhoff, S. (2014). Index of soil physical quality of hardsetting soils on the brazilian coast. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38, 1722-1730.
- de Lima, R. P., da Silva, A. R., da Silva, A. P., Leão, T. P., & Mosaddeghi, M. R. (2016). soilphysics: An R package for calculating soil water availability to plants by different soil physical indices. *Computers and Electronics in Agriculture*, 120, 63-71.
- de Moraes, M. T., Debiasi, H., Carlesso, R., Franchini, J. C., da Silva, V. R., & da Luz, F. B. (2016). Soil and Tillage Research. *Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil*, 155, 351-362.
- de Oliveira, E. C., Freire, F. J., de Oliveira, A. C., Simões Neto, D. E., da Rocha, A. T., & de Carvalho, L. A. (2011). Produtividade, eficiência de uso da água e qualidade tecnológica de cana-de-açúcar submetida a diferentes regimes hídricos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 46, 617-625.

- de Oliveira, L. B. (1968). Determinação da macro e microporosidade pela " mesa de tensão" em amostras de solo com estrutura indeformada. *Pesquisa agropecuaria brasileira*, 3, 197-200.
- de Oliveira, M. W., Freire, F. M., Macêdo, G. A., & Ferreira, J. J. (2007). Nutrição mineral e adubação da cana-de-açúcar. *Informe Agropecuário*, 28, 239, 30-43. Belo Horizonte.
- de Orellana, J. A., Pilatti, M. A., & Grenón, D. A. (1997). Soil quality: An approach to physical state assessment. *Journal of sustainable agriculture*, 9, 91-108.
- de Orellana, J., & Pilatti, M. A. (1993). Posibles indicadores edáficos de sostenibilidad. II: El intervalo hídrico óptimo. *Actas XIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*: 19.20, 74.
- Dexter, A. R. (2004a). Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, 120, 201-214.
- Dexter, A. R. (2004b). Soil physical quality: Part II. Friability, tillage, tilth and hard-setting. *Geoderma*, 120, 215-225.
- Dexter, A. R. (2004c). Soil physical quality: Part III: Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. *Geoderma*, 120, 227-239.
- Dexter, A. R., & Czyż, E. A. (2007). Applications of S-theory in the study of soil physical degradation and its consequences. *Land Degradation & Development*, 18, 369-381.
- Dexter, A. R., & Richard, G. (2009). Tillage of soils in relation to their bi-modal pore size distributions. *Soil & Tillage Research*, 103, 113-118.
- Dias, C. B. (2012). Dissertação. *Propriedades físicas e intervalo hídrico ótimo de um latossolo amarelo coeso sob diferentes usos no ecossistema tabuleiro costeiro*, 42. Viçosa, Minas Gerais, Brasil.
- Doran, J. W. (2002). Soil health and global sustainability: translating science into practice. *Agriculture, ecosystems & environment*, 88, 119-127.
- Duarte Jr, J. B., & Coelho, F. C. (2008). A cana-de-açúcar em sistema de plantio direto comparado ao sistema convencional com e sem adubação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 12, 576-584.

- Duiker, S. W. (2006). Aggregation . Em R. Lal, *Encyclopedia of soil science* (Vol. 2, pp. 49-51). CRC Press.
- Duiker, S. W., & Fritton, D. D. (2009). Introduction to soil physics. Em R. Lal, *Agricultural Sciences - Volume I* (Vol. 1, p. 462). Rattan Lal.
- EMBRAPA. (2011). *Manual de métodos de análises de solos*. Rio de Janeiro, Brasil: Embrapa Solos.
- EMBRAPA. (Novembro de 2014). Relatório final. *Delimitação da área de atuação da Embrapa Tabuleiros Costeiros*. Aracaju, Sergipe, Brasil.
- EPAMIG. (11 de 2012). ANÁLISE DO SOLO. *Determinações, cálculos e interpretação*. Lavras, Minas Gerais, Brasil.
- FAO. (2011). *The state of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW) – Managing systems at risk*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2012). *FAOSTAT*. Acesso em 17 de março de 2015, disponível em FAOSTAT: <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>
- Ferreira, M. M. (2010). Caracterização Física do Solo. Em S. B. Solo (Ed.), *Física do solo* (p. 298). Viçosa: van Lier, Q. J.
- Flint, A. L., & Flint, L. E. (2002). Porosity. Em *Methods of Soil Analysis: Part 4 - Physical Methods* (pp. 241-265). Dane J. H.; Topp G. C.
- Gardner, C. M., Laryea, K. B., & Unger, P. W. (1999). *Soil physical constraints to plant growth and crop production*. Land and Water Development Division, Food and Agriculture Organization.
- Gardner, W. H. (1986). Early soil physics into the mid-20th century. Em *Advances in soil science* (pp. 1-101). New York: Stewart, B. A.
- Gardner, W. R. (1972). The impact of L. A. Richards upon the field of soil water physics 1. *Soil Science*, 113, 232-237.
- Gee, G. W., & Or, D. (2002). 2.4 Particle-size analysis. Em *Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods* (pp. 255-293).
- Giarola, N. F., & da Silva, A. P. (2002). Conceitos sobre solos coesos e hardsetting. *Scientia Agricola*, 59, 613-620.
- Giarola, N. F., de Lima, H. V., & da Silva, A. P. (2011). Hardsetting Soils: Physical Properties. Em *Encyclopedia of Agrophysics* (pp. 360-363). Springer Netherlands.

- Gomes, J. B., Fernandes, M. F., Barreto, A. C., Araújo Filho, J. C., & Curi, N. (2012). Soil attributes under agroecosystems and forest vegetation in the coastal tablelands of northeastern Brazil. *Ciência e Agrotecnologia*, 36, 649-664.
- Grable, A. R., & Siemer, E. G. (1968). 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*, 32, 180-186.
- Groenevelt, P. H., & Bolt, G. H. (1972). Water retention in soil. *Soil Science*, 113, 238-245.
- Groenevelt, P. H., Grant, C. D., & Murray, R. S. (2004). On water availability in saline soils. *Soil Research*, 42, 833-840.
- Groenevelt, P. H., Grant, C. D., & Semetsa, S. (2001). A new procedure to determine soil water availability. *Soil Research*, 39, 577-598.
- Grossman, R. B., & Reinsch, T. G. (2002). 2.1 Bulk density and linear extensibility. Em *Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods* (pp. 201-228). Dane, J. H; Topp, G. C.
- Gubiani, P. I., Reichert, J. M., & Reinert, D. J. (2013). Indicadores hídrico-mecânicos de compactação do solo e crescimento de plantas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37, 1-10.
- Guedes Filho, O., Blanco-Canqui, H., & da Silva, A. P. (2013). Least limiting water range of the soil seedbed for long-term tillage and cropping systems in the central Great Plains, USA. *Geoderma*, 207, 99-110.
- Gupta, S. C., & Wang, D. (2007). Water Retention in Soil. Em *Encyclopedia of Soil Science, Second Edition* (pp. 1864-1869). Taylor & Francis.
- Haise, H. R., Haas, H. J., & Jensen, L. R. (1955). Soil moisture studies of some great plains soils: II. Field capacity as related to 1/3-atmosphere percentage, and "minimum point" as related to 15-and 26-atmosphere percentages. *Soil Science Society of America Journal*, 19, 20-25.
- Hill, R. L., Horton, R., & Cruse, R. M. (1985). Tillage effects on soil water retention and pore size distribution of two Mollisols. *Soil Science Society of America Journal*, 49, 1264-1270.
- Hillel, D. (1998). *Environmental soil physics: Fundamentals, applications, and environmental considerations*. Academic press.

- Hillel, D. (2006). Human Culture and Soils. Em *Encyclopedia of Soil Science* (pp. 835-837). Taylor & Francis.
- Jabro, J. D., Iversen, W. M., Stevens, W. B., Evans, R. G., Mikha, M. M., & Allen, B. L. (2016). Physical and hydraulic properties of a sandy loam soil under zero, shallow and deep tillage practices. *Soil and Tillage Research*, 159, 67-72.
- Kaiser, D. R., Reinert, D. J., Reichert, J. M., Collares, G. L., & Kunz, M. (2009). Intervalo hídrico ótimo no perfil explorado pelas raízes de feijoeiro em um Latossolo sob diferentes níveis de compactação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33, 845-855.
- Kargas, G., Kerkides, P., Sotirakoglou, K., & Poulouvassilis, A. (2016). Temporal variability of surface soil hydraulic properties under various tillage systems. *Soil and Tillage Research*, 158, 22-31.
- Karuma, A., Mtakwa, P., Amuri, N., Gachene, C. K., & Gicheru, P. (2014). Tillage Effects on Selected Soil Physical Properties in a Maize-Bean Intercropping System in Mwala District, Kenya. *International Scholarly Research Notices*, 1-12.
- Kay, B. D., & VandenBygaart, A. J. (2002). Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. *Soil and Tillage Research*, 66, 107-118.
- Kemper, W. D., & Chepil, W. S. (1965). Size distribution of aggregation. Em *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling* (pp. 499-510). Black, C. A.; Evans, D. D.; White, J. L.; Ensminger, L. E.; Clark, F. E.
- Kibblewhite, M. G., Ritz, K., & Swift, M. J. (2008). Soil health in agricultural systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 363, 685-701.
- Kirkham, D. (1973). Soil physics and soil fertility. *Bulletin des Recherches Agronomiques de Gembloux Faculté des Sciences Agronomiques de l'État*, 8, 60-88.
- Kirkham, M. B. (2005). *Principles of soil and plant water relations*. Elsevier Academic Press.
- Kirkham, M. B. (2014). *Principles of soil and plant water relations*. Academic Press.

- Klein, V. A., & Libardi, P. L. (2002). Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Ciência do solo*, 26, 857-867.
- Klute, A. (1965). Laboratory measurement of hydraulic conductivity of saturated soil. Em *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling* (pp. 210-221). Madison, Wisconsin, USA: Black, C A; Klute, A; Miller, R H; Page, A L.
- Lal, R., & Shukla, M. K. (2004). *Principles of soil physics*. CRC Press.
- Landa, E. R., & Nimmo, J. R. (2003). The life and scientific contributions of Lyman J. Briggs. *Soil Science Society of America Journal*, 67, 681-693.
- Leão, T. P., & Silva, A. P. (2004). A simplified Excel® algorithm for estimating the least limiting water range of soils. *Scientia Agricola*, 61, 649-654.
- Leão, T. P., da Silva, A. P., Perfect, E., & Tormena, C. A. (2005). An algorithm for calculating the least limiting water range of soils. *Agronomy Journal*, 97, 1210-1215.
- Leamer, R. W., & Shaw, B. (1941). Simple apparatus for measuring noncapillary porosity on an extensive scale. *Journal of the American Society of Agronomy*.
- Letey, J. O. (1985). Relationship between soil physical properties and crop production. Em *Advances in soil science* (pp. 277-294). New York: Springer.
- Ley, G. J., Mullins, C. E., & Lal, R. (1995). The potential restriction to root growth in structurally weak tropical soils. *Soil and Tillage Research*, 33, 133-142.
- Libardi, P. L. (2005). *Dinâmica da Água no Solo* (Vol. 61). Edusp.
- Lin, L. R., He, Y. B., & Chen, J. Z. (2016). The influence of soil drying-and tillage-induced penetration resistance on maize root growth in a clayey soil. *Journal of Integrative Agriculture*, 15, 1112-1120.
- Lipiec, J., Kuś, J., Słowińska-Jurkiewicz, A., & Nosalewicz, A. (2006). Soil porosity and water infiltration as influenced by tillage methods. *Soil and Tillage research*, 89, 210-220.
- Maia, J. L., & Ribeiro, M. R. (2004). Propriedades de um Argissolo Amarelo fragipânico de Alagoas sob cultivo contínuo da cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 39, 79-87.

- Marafon, A. (2012). *Análise quantitativa de crescimento em cana-de-açúcar: uma introdução ao procedimento prático*. Fonte: www.cpatc.embrapa.br/publicacoes_2012/doc_168.pdf
- Materechera, S. A. (2009). Aggregation in a surface layer of a hardsetting and crusting soil as influenced by the application of amendments and grass mulch in a South African semi-arid environment. *Soil and Tillage Research*, 105, 251-259.
- Mauri, J., Ruiz, H. A., Fernandes, R. B., Ker, J. C., & Rezende, L. R. (2011). Chemical dispersion in particle size analysis of Latosols. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35, 1277-1284.
- Mazoyer, M., & Roudart, L. (2010). *História das agriculturas no mundo: Do neolítico à crise contemporânea*. São Paulo: UNESP.
- Melo, D. V., Almeida, B. G., Souza, E. R., Silva, L. S., & Jacomine, P. K. (2014). Structural quality of polyacrylamide-treated cohesive soils in the coastal tablelands of Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38, 476-485.
- Melo, L. J., Oliveira, F. J., Bastos, G. Q., Anunciação Filho, C. J., & Reis, O. V. (2009). Desempenho agroindustrial de cultivares de cana-de-açúcar na zona da mata litoral sul de Pernambuco. *Ciênc. agrotec.*, 33, 684-691.
- Minasny, B., & McBratney, A. B. (2003). Integral energy as a measure of soil-water availability. *Plant and Soil*, 249, 253-262.
- Mishra, A. K., Aggarwal, P., Bhattacharyya, R., Das, T. K., Sharma, A. R., & Singh, R. (2015). Least limiting water range for two conservation agriculture cropping systems in India. *Soil and Tillage Research*, 150, 43-56.
- Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water resources research*, 12, 513-522.
- Mullins, C. E. (1997). Hardsetting. Em W. B. R Lal, *Methods for assessment of soil degradation* (pp. 109–128). CRC Press.
- Naderi-Boldaji, M., & Keller, T. (2016). Degree of soil compactness is highly correlated with the soil physical quality index S. *Soil and Tillage Research*, 159, 41-46.

- Nciizah, A. D., & Wakindiki, I. I. (2012). Aggregate stability and strength of a hardsetting soil amended with cattle manure. *African Journal of Agricultural Research*, 7, 68-73.
- Nimmo, J. R., & Perkins, K. S. (2002). Aggregate stability and size distribution. Em *Methods of Soil Analysis. Part 4 - Physical Methods* (pp. 812-815). Dane, J. H.; Topp, G.C.
- novaCana. (2008). *novaCana*. Acesso em 17 de 2015 de 2015, disponível em <http://www.novacana.com/cana/producao-cana-de-acucar-brasil-e-mundo/>
- NRCS, U. Soil Survey Division Staff. (1993). Soil Survey Manual. Soil Conservation Service. *US Department of Agriculture Handbook*, 18, 315.
- Pacheco, E. P., & Cantalice, J. R. (2011a). Análise de trilha no estudo dos efeitos de atributos físicos e matéria orgânica sobre a compressibilidade e resistência à penetração de um Argissolo cultivado com cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35, 417-428.
- Pacheco, E. P., & Cantalice, J. R. (2011b). 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*, 35, 403-415.
- Paiva, A. D., Souza, L. D., Ribeiro, A. C., & Costa, L. D. (2000). Propriedades físico-hídricas de solos de uma toposseqüência de tabuleiro do estado da Bahia. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 35, 2295-2302.
- Pilatti, M. A., De Orellana, J., Imhoff, S., & Da Silva, A. P. (2012). Actualización de los límites críticos del intervalo hídrico óptimo. *Ci. Suelo*, 30, 9-21.
- Prevedello, C. L. (1996). *Física do solo com problemas resolvidos*.
- Prevedello, J., Vogelmann, E. S., Kaiser, D. R., & Reinert, D. J. (2013). A funcionalidade do sistema poroso do solo em floresta de eucalipto sob Argissolo. *Scientia Forestalis*.
- R Core Team. (2016). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. Fonte: <https://www.R-project.org/>
- Raats, P. A. (2001). Developments in soil–water physics since the mid 1960s. *Geoderma*, 100, 355-387.

- Rawls, W. J. (1983). Estimating soil bulk density from particle size analysis and organic matter content. *Soil Science*, 135, 123-125.
- Reynolds, W. D., & Elrick, D. E. (2002). Constant head well permeameter (vadose zone). Em D. J. H., & T. G. C., *Methods of soil analysis. Part 4: physical methods* (pp. 844-858). Wisconsin: Soil Science Society of America.
- Richard, G., Cousin, I., Sillon, J. F., Bruand, A., & Guérif, J. (2001). Effect of compaction on the porosity of a silty soil: influence on unsaturated hydraulic properties. *European Journal of Soil Science*, 52, 49-58.
- Richards, L. A. (1928). The usefulness of capillary potential to soil-moisture and plant investigators. *Journal of Agricultural Research*, 37.
- Richards, L. A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Journal of Applied Physics*, 1, 318-333.
- Richards, L. A. (1965). Physical condition of water in soil. Em *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling* (pp. 128-152). Black, C. A.; Evans, D. D.; White, J. L.; Ensinger, L. E.; Clark, F. E.
- Richards, L. A., & Wadleigh, C. H. (1952). Soil water and plant growth. Em *Soil physical conditions and plant growth* (Vol. 2, pp. 74-253). B T Shaw.
- Richards, L. A., & Weaver, L. R. (1944). Fifteen atmosphere percentage as related to the permanent wilting point. *Soil Science*, 331-339.
- Rogawski, J. (2009). *Cálculo* (Vol. 1). Porto Alegre: Bookman.
- Ross, P. J., Williams, J., & Bristow, K. L. (1991). Equation for extending water-retention curves to dryness. *Soil Science Society of America Journal*, 55, 923-927.
- Safadoust, A., Feizee, P., Mahboubi, A. A., Gharabaghi, B., Mosaddeghi, M. R., & Ahrens, B. (2014). Least limiting water range as affected by soil texture and cropping system. *Agricultural Water Management*, 136, 34-41.
- Santos, D. H., Silva, M. D., Tiritan, C. S., FOLONI, J. S., & Echer, F. R. (2011). Qualidade tecnológica da cana-de-açúcar sob adubação com torta de filtro enriquecida com fosfato solúvel. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 443-449.
- Shaw, B. T. (1952). Soil physical conditions and plant growth. *Soil Science*, 74, 264.

- Silva, A. J., Cabeda, M. S., & Lima, J. F. (2005). Efeito de sistemas de uso e manejo nas propriedades físico-hídricas de um Argissolo Amarelo de tabuleiro costeiro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 29, 833-842.
- Silva, B. M., Oliveira, G. C., Serafim, M. E., Silva, É. A., Ferreira, M. M., Norton, L. D., & Curi, N. (2015). Critical soil moisture range for a coffee crop in an oxidic Latosol as affected by soil management. *Soil and Tillage Research*, 154, 103-113.
- Silva, G. L., Lima, H. V., Campanha, M. M., Gilkes, R. J., & Oliveira, T. S. (2011). Soil physical quality of Luvisols under agroforestry, natural vegetation and conventional crop management systems in the Brazilian semi-arid region. *Geoderma*, 167, 61-70.
- Silva, M. D., Silva, J. A., Enciso, J., Sharma, V., & Jifon, J. (2008). Yield components as indicators of drought tolerance of sugarcane. *Scientia Agricola*, 65, 620-627.
- Silveira, D. D., Melo Filho, J. F., Sacramento, J. A., & Silveira, E. C. (2010). Relação umidade versus resistência à penetração para um Argissolo Amarelo distrocoeso no recôncavo da Bahia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 34, 659-667.
- Simões Neto, D. E., & Melo, L. J. (2005). *Lançamentos de novas variedades RB de cana-de-açúcar*. Recife, Pernambuco, Brasil: Imprensa Universitária.
- Simões Neto, D. E., de Oliveira, A. C., da Rocha, A. T., Freire, F. J., Freire, M. B., & do Nascimento, C. W. (2012). Características agroindustriais da cana-de-açúcar em função da adubação fosfatada, em solos de Pernambuco. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 16, 347-354.
- Smith, D. M., Inman-Bamber, N. G., & Thorburn, P. J. (2005). Growth and function of the sugarcane root system. 92, 169-183.
- Strudley, M. W., Green, T. R., & Ascough, J. C. (2008). Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science. *Soil and Tillage Research*, 99, 4-48.
- Surendran, U., Ramesh, V., Jayakumar, M., Marimuthu, S., & Sridevi, G. (2016). Improved sugarcane productivity with tillage and trash management practices in semi arid tropical agro ecosystem in India. *Soil and Tillage Research*, 158, 10-21.

- Tavares, O. C., Lima, E., & Zonta, E. (2010). Crescimento e produtividade da cana planta cultivada em diferentes sistemas de preparo do solo e de colheita. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 32, 61-68.
- Taylor, H. M., Roberson, G. M., & Parker Jr, J. J. (1966). Soil strength-root penetration relations for medium-to coarse-textured soil materials. *Soil science*, 102, 18-22.
- Tisdall, J. M., & Oades, J. (1982). Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of soil science*, 33, 141-163.
- Topp, G. C., Galganov, Y. T., Wires, K. C., & Culley, J. L. (1994). *Non limiting water range (NLWR): an approach for assessing soil structure*. - *Soil Quality Evaluation Program (Technical report, 2)*. Ottawa, Canada: Centre for Land and Biological Resources Research, Agriculture and Agri-Food.
- Topp, G. C., Reynolds, W. D., Cook, F. J., Kirby, J. M., & Carter, M. R. (1997). Physical attributes of soil quality. Em E. Gregorich, & M. Carter, *Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health. Developments in Soil Science* (Vol. 25, pp. 21-58). New York, NY: Elsevier.
- Tormena, C. A., da Silva, Á. P., Imhoff, S. D., & Dexter, A. R. (2008). Quantification of the soil physical quality of a tropical oxisol using the S index. *Scientia Agricola*, 65, 56-60.
- Tormena, C. A., da Silva, A. D., & Libardi, P. L. (1998). Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 22, 573-581.
- Tormena, C. A., da Silva, A. P., & Libardi, P. L. (1999). Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. *Soil and Tillage Research*, 52, 223-232.
- UNICA. (2014). *União da Indústria de cana-de-açúcar*. Acesso em 20 de março de 2015, disponível em <http://www.unica.com.br/faq/>
- van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, 892-898.
- Vasconcelos, R. D., Cantalice, J. R., Oliveira, V. D., Costa, Y. D., & Cavalcante, D. M. (2010). Estabilidade de agregados de um Latossolo Amarelo distrocoeso de tabuleiro costeiro sob diferentes aportes de resíduos orgânicos da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 34, 309-316.

- Vasconcelos, R. D., Souza, E. R., Cantalice, J. R., & Silva, L. S. (2014). Qualidade física de Latossolo Amarelo de tabuleiros costeiros em diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 18, 381-386.
- Veihmeyer, F. J., & Hendrickson, A. H. (1927). Soil-moisture conditions in relation to plant growth. *Plant physiology*, 2, 71-81.
- Veihmeyer, F. J., & Hendrickson, A. H. (1931). The moisture equivalent as a measure of the field capacity of soils. *Soil Science*, 32, 181-194.
- Veihmeyer, F. J., & Hendrickson, A. H. (1949). Methods of measuring field capacity and permanent wilting percentage of soils. *Soil science*, 68, Soil science.
- Vieira, M. L., & Klein, V. A. (2007). Propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31, 1271-1280.
- Wilson, M. G., Sasal, M. C., & Caviglia, O. P. (2013). Critical bulk density for a Mollisol and a Vertisol using least limiting water range: Effect on early wheat growth. *Geoderma*, 192, 354-361.
- Yoder, R. E. (1936). A direct method of aggregate analysis of soil and a study of the physical nature erosion losses. *Journal of American Society of Agronomy*, 28, 337-351.
- Young, I. M., Mullins, C. E., Costigan, P. A., & Bengough, A. G. (1991). Hardsetting and structural regeneration in two unstable British sandy loams and their influence on crop growth. *Soil and Tillage Research*, 19, 383-394.