

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS**

**INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO DE UM SOLO SUBMETIDO  
A DOIS PREPAROS CONSERVACIONISTAS PARA A  
PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR**

ANDRÉS HIDEKI TANAKA SUÁREZ

DOURADOS  
MATO GROSSO DO SUL  
2018

**INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO DE UM SOLO SUBMETIDO A  
DOIS PREPAROS CONSERVACIONISTAS PARA A PRODUÇÃO  
DE CANA-DE-AÇÚCAR**

ANDRÉS HIDEKI TANAKA SUÁREZ

Orientador: PROF. DR. CRISTIANO MÁRCIO ALVES DE SOUZA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Universidade Federal da Grande Dourados,  
como parte das exigências para conclusão do  
curso de Engenharia Agrícola.

DOURADOS  
MATO GROSSO DO SUL  
2018

## Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

S939i Suarez, Andres Hideki Tanaka

Intervalo hídrico ótimo de um solo submetido a dois preparos conservacionistas para a produção de cana-de-açúcar [recurso eletrônico] / Andres Hideki Tanaka Suarez. – 2018.  
Arquivo em formato pdf.

Orientador: Cristiano Márcio Alves De Souza.

TCC (Graduação em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal da Grande Dourados, 2018.

Disponível no Repositório Institucional da UFGD em:

<https://portal.ufgd.edu.br/setor/biblioteca/repositorio>

1. modelagem matemática. 2. resistência do solo à penetração. 3. latossolo vermelho distroférico. I. Souza, Cristiano Márcio Alves De. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.

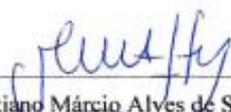
**INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO DE UM SOLO SUBMETIDO A DOIS  
PREPAROS CONSERVACIONISTAS PARA A PRODUÇÃO DE CANA-DE-  
AÇÚCAR**

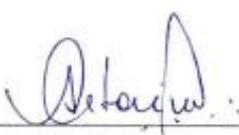
Por

Andrés Hideki Tanaka Suárez

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos exigidos para  
obtenção do título de ENGENHEIRO AGRÍCOLA

Aprovada: 30 de novembro de 2018.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Cristiano Márcio Alves de Souza  
Orientador – UEGD/FCA

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Antônio Carlos Tadeu Vitorino  
Membro da Banca – UFGD/FCA

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Sálvio Napoleão Soares Arcoverde  
Membro da Banca – UFGD/PGEA

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, e por me proporcionar saúde, proteção e segurança na minha jornada.

Ao meu orientador Prof. Dr. Cristiano Márcio Alves de Souza, pelo apoio, paciência, confiança, atenção, preocupação e pela oportunidade de trabalharmos juntos, durante os cinco anos do curso.

A Profa. Dra. Leidy Zulys Leyva Ráfull por sempre ter se preocupado e me aconselhado em todos os momentos durante a minha graduação.

Aos Professores Roberto Carlos Orlando e Valdiney Cambuy Siqueira, pela confiança, apoio, amizade e conhecimentos compartilhados.

Aos meus pais, Willy Tanaka Nakawatase e Lorgia Suárez Vaca, por ter me dado a oportunidade de realizar a minha formação superior, fora do meu país natal.

Aos meus irmãos Willy Kenji, Diego Eiki, Daniel Seiki, pela constante preocupação e apoio durante esta jornada.

A minha esposa, Alessandra Inés Mealla Soria, pela confiança, amor, carinho, e por sempre ter acreditado e me apoiado nos momentos difíceis e de conquista.

Ao meu maravilhoso e amado filho, Hideki Tanaka Mealla, por ser o motor da minha vida e me impulsionar a conquistar novos desafios.

Aos professores do curso de Engenharia Agrícola, por terem contribuído na minha formação, e superado as expectativas do meu intercâmbio.

Aos meus amigos, Celizangela, Ebert, Sálvio, Paulo e Wesley, pelos anos de parceria, convivência, ensinamentos, dias e noites de muito esforço e estudo, trabalhos de campo e por terem caminhado comigo nesta difícil e bem-sucedida jornada.

## SUMÁRIO

	PÁGINA
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1.    Cana-de-açúcar.....	4
2.2.    Sistemas de preparo do solo.....	5
2.3.    Atributos físicos do solo.....	6
2.4.    Intervalo hídrico ótimo.....	7
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	9
3.1.    Local.....	9
3.2.    Delineamento.....	9
3.3.    Preparo do solo, plantio, tratos culturais.....	9
3.4.    Equipamentos e métodos.....	10
3.5.    Coleta de amostras.....	11
3.6.    Determinação dos atributos físico-hídrico-mecânicos.....	11
3.6.1. Densidade e Porosidade total do solo.....	11
3.6.2. Conteúdo de água do solo.....	12
3.6.3. Resistência mecânica do solo à penetração das raízes.....	12
3.7.    Intervalo Hídrico Ótimo.....	12
3.8.    Análises estatísticas.....	14
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	15
5. CONCLUSÕES.....	24
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	25

SUÁREZ, Andrés Hideki Tanaka. **Intervalo hídrico ótimo de um solo submetido a dois preparos conservacionistas para a produção de cana-de-açúcar**. 2018. 28f. Monografia (Graduação em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados – MS.

## RESUMO

A cultura de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é uma das culturas de maior interesse econômico no mundo, sendo o Brasil o país que possui a maior área plantada, compreendendo aproximadamente 55% da produção mundial de cana-de-açúcar. Devido a esta grande importância, tem-se buscado práticas de manejo do solo que promovam mínimas alterações nos atributos físicos do mesmo, tendo que o uso de práticas convencionais intensivas o afeta negativamente e promovem a sua degradação, resultando em perdas de produtividade e qualidade do cultivo de cana-de-açúcar. Porém, existem práticas conservacionistas de preparo do solo que promovem melhores condições para o crescimento das plantas, já que o preparo para a cultura de cana-de-açúcar deve ser feito uma única vez, para todo o ciclo da mesma, tendo em média um ciclo de 5 anos. Este trabalho consistiu em avaliar a qualidade do preparo de um Latossolo Vermelho Distroférico, em dois sistemas conservacionistas de preparo do solo, utilizando o intervalo hídrico ótimo (IHO), como indicador de sua qualidade físico-hídrica. Para este estudo, foram determinadas a umidade volumétrica na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente, a porosidade de aeração mínima e a resistência mecânica do solo à penetração, obtidas em área cultivadas com cana-de-açúcar com solo manejado sobre preparo reduzido e plantio direto. O intervalo hídrico ótimo demonstrou-se ser um bom indicador de qualidade físico-hídrica de solo cultivado com cana-de-açúcar sob os dois preparos conservacionistas. O plantio direto apresentou maior amplitude do intervalo hídrico ótimo quando comparado com o preparo reduzido, independentemente do valor de resistência do solo à penetração adotado como restritivo ao desenvolvimento da cana-de-açúcar. A densidade crítica do solo manejado com o Plantio Direto de cana está entre 1,48 e 1,53 Mg m<sup>-3</sup> para resistências à penetração de 2 e 4 MPa, enquanto que quando manejado com preparo reduzido está entre 1,44 e 1,51 Mg m<sup>-3</sup>.

**Palavras-chave:** modelagem matemática, resistência do solo à penetração, latossolo vermelho distroférico

SUÁREZ, Andrés Hideki Tanaka. **Least limiting water range of a soil submitted to two conservationist preparations for the production of sugarcane.** 2018. 28P. Monography (Undergraduate in Agricultural Engineering) - Federal University of Grande Dourados, Dourados - MS.

### ABSTRACT

Sugarcane (*Saccharum* spp.) is one of the most economically important crops in the world, Brazil being the country with the largest planted area, accounting for approximately 55% of the world's sugarcane production. Due to this great importance, we have sought soil management practices that promote minimal changes in the physical attributes of the soil, and the use of intensive conventional practices adversely affects it and promote its degradation, resulting in losses of productivity and quality of the soil cultivation of sugarcane. However, there are conservationist practices of soil preparation that promote better conditions for the growth of the plants, since the preparation for the sugarcane crop must be done only once, for the whole cycle of the same, having on average one cycle of 5 years. This work consisted in evaluating the quality of the preparation of a oxisol in two soil conservation systems using the Least limiting water range (LLWR) as an indicator of its physical-water quality. For this study, volumetric moisture was determined in the field capacity and at the permanent wilting point, the minimum aeration porosity and the mechanical resistance of the soil to the penetration, obtained in areas cultivated with sugarcane with soil managed on reduced tillage and no-tillage. The least limiting water range has been shown to be a good indicator of the physical-water quality of soil cultivated with sugarcane under both conservationist techniques. No-tillage presented a greater amplitude of the optimum water range when compared to reduced tillage, regardless of the soil resistance value to the penetration adopted as restrictive to the development of sugarcane. The critical soil density managed by Cane Direct Plantation is between 1.48 and 1.53 Mg m<sup>-3</sup> for penetration resistance of 2 and 4 MPa, while when run with reduced tillage it is between 1.44 and 1.51 Mg m<sup>-3</sup>.

**Keywords:** mathematical modeling, resistance to soil penetration, oxisol

## 1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é uma das culturas mais importantes no Brasil e no mundo, sendo a sua matéria prima responsável principalmente pela produção de açúcar, álcool combustível e bioeletricidade, fazendo da cana-de-açúcar a uma das culturas de maior interesse econômico do país. O Brasil é reconhecido por ser o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e, segundo dados da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO), em 2016, o País produziu aproximadamente 691 milhões de toneladas, representando 55,2% da produção mundial, seguido por Índia com 25,0%, China com 8,8%, Tailândia com 6,3% e Paquistão com 4,7%.

A produção de cana-de-açúcar brasileira na última safra (2017/18) foi de 646,3 milhões de toneladas, a área cultivada de 8,7 milhões de hectares e a produtividade média da cultura de 73,7 Mg ha<sup>-1</sup>. No estado do Mato Grosso do Sul, a área dedicada para o cultivo da cana-de-açúcar foi de 660,4 mil hectares, a produção de 50.453,68 mil toneladas e a produtividade de 76,4 Mg ha<sup>-1</sup>. A produtividade teve um acréscimo de 5,3% em relação à safra anterior, devido às intensas chuvas ocorridas no primeiro trimestre deste ano, que contribuíram para o desenvolvimento da cultura (CONAB, 2018).

O ciclo de cultivo de cana-de-açúcar desde o preparo do solo até a colheita demanda de diversas operações agrícolas mecanizadas que transmitem cargas pesadas ao solo. Entre estas operações destacam-se a aração, gradagem, sulcação, adubação, plantio, colheita, transporte por transbordos e recolhimento e transporte do palhicho, ocasionando mudanças na estrutura física do solo.

Para o plantio da cana-de-açúcar normalmente é realizado o preparo convencional do solo, que pode apresentar distintas combinações com arações, gradagens e subsolagens. Tais operações têm a finalidade de fornecer ao solo uma melhor condição para a brotação e o desenvolvimento inicial da cultura que será implantada, desagregando as camadas compactadas do solo. Porém, o uso excessivo desta técnica provoca a degradação do solo que afeta diretamente as qualidades físicas, químicas e biológicas do mesmo (PORTUGAL et al., 2012).

O uso de práticas inadequadas de manejo de solo aliado às cargas pesadas geradas pelo tráfego de máquinas e equipamentos sobre a área cultivada de cana-de-açúcar provoca alterações nos atributos físicos do solo, como aumento da densidade e, conseqüentemente, redução da macroporosidade e aumento da resistência à penetração,

ocasionando dificuldade de crescimento do sistema radicular da planta, aeração e suprimento de água e nutrientes para a mesma (CAVALIERI et al., 2006).

Sistemas conservacionistas de preparo de solo têm sido ótimas alternativas para diminuir os efeitos da degradação e erosão do solo na cultura de cana-de-açúcar (MELO, 2018; PRADO, 2015). Na implantação do plantio direto é feito um único preparo, com diversas operações, similar ao sistema convencional, aração, gradagem e adubação, porém na safra sucessora não haverá revolvimento do solo, será aproveitada a palha e restos culturais (matéria orgânica) da cultura antecessora para oferecer cobertura para o solo.

Os restos culturais protegem o solo contra o impacto da gota de chuva e diminuem a perda de água por evaporação na superfície do solo. Posteriormente, aquela matéria orgânica favorecerá a agregação do solo, aumentando a macroporosidade, facilitando a aeração do solo e ao mesmo tempo fornecendo uma estrutura favorável para o crescimento e desenvolvimento das raízes.

A densidade do solo é um atributo físico importante no estudo da qualidade estrutural do mesmo, pois auxilia na avaliação dos efeitos de sistemas de preparo de solo, enquanto a resistência mecânica do solo à penetração estabelece relação direta com o crescimento e desenvolvimento do sistema radicular das plantas.

Para determinação da qualidade físico-hídrica do solo, tem sido utilizado o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) como indicador de qualidade, por integrar os parâmetros de capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade total de aeração (PA) e resistência mecânica à penetração das raízes (RP) (LETEY, 1985; SILVA, 1994; TORMENA et al. 2007; SERAFIM et al. 2008; PRADO, 2015, PELLIN, 2017).

Prado (2015) estudou a qualidade física do solo em sistemas conservacionistas e espécies usadas na renovação do canavial, e verificou que o IHO é um indicador efetivo de alterações da estrutura do Latossolo Vermelho Distroférrico. De acordo com Dias et al. (2016) condições para bom desenvolvimento e crescimento das plantas ocorrem entre os limites superiores e inferiores do IHO, conseqüentemente, valores fora destes limites representaram restrições para o crescimento da planta. Pellin (2017) constatou que o uso de práticas conservacionistas proporciona maiores amplitudes do IHO, em Latossolo Vermelho Distroférrico cultivados com cana-de-açúcar.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi determinar o IHO de um Latossolo Vermelho Distroférrico submetido a dois tipos de preparo conservacionista,

plântio direto e preparo reduzido, na camada de 0-20 cm, para a produção de cana-de-açúcar.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é uma cultura de grande importância a nível mundial, por ser utilizada como matéria-prima para a produção de açúcar e etanol, os quais são produtos indispensáveis para o dia a dia das pessoas. Para consumo alimentício no caso do açúcar e como combustível para motores de combustão interna como é caso do bioetanol. Além da importância que tem o uso do resíduo, como matéria-prima para a queima nas caldeiras das usinas gerando energia elétrica a partir do bagaço e da palha, produzindo energia limpa e sustentável (SANTOS, 2013).

A produção total de cana-de-açúcar na safra 2017/18 foi de 646,3 milhões de toneladas, sofrendo uma redução de 6,46% em relação à safra anterior, significando uma diminuição de 44,6 milhões de toneladas. Do total dessa safra 54,6% proveio de São Paulo, 10,9% do Goiás, 10,0% de Minas Gerais, 7,8% do Mato Grosso do Sul e 6,0% do Paraná (CONAB, 2018).

Para o estado do Mato Grosso do Sul a área de cana-de-açúcar plantada aumentou em 9,1% passando de 605,3 mil hectares na safra 2016/17 para 660,4 mil hectares na safra 2017/18. A produtividade da cultura também teve um incremento de 0,74% passando de 77,6 Mg ha<sup>-1</sup> para 78,1 Mg ha<sup>-1</sup>, a produção atingiu 50.456,7 mil toneladas representando um aumento de 4,9 % em relação à safra anterior que foi de 4.088,10 mil toneladas (CONAB, 2018).

A bioeletricidade produzida a partir do bagaço e da palha da cana-de-açúcar, é a terceira fonte mais importante da matriz elétrica do Brasil. Em termos de capacidade instalada, atingiu em maio de 2018 o marco de 11.356 GW em potência efetivamente fiscalizada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (UNICA, 2018).

A cana-de-açúcar é uma cultura semi-perene, cultivada por vários anos na mesma área, apresenta um ciclo médio de vida de 5 anos dependendo das condições edafoclimáticas e o nível tecnológico aplicado (MELO, 2018). Sua produtividade média aproximada é de 120 Mg ha<sup>-1</sup> no primeiro corte, diminuindo gradativamente em cada corte até aproximadamente 73 Mg ha<sup>-1</sup> no quinto corte (SANTOS, 2013). Cultivos comerciais de cana-de-açúcar permitem de 3 a 6 cortes da cultura, podendo optar por renovação do canavial após esse período (PRADO, 2015). Por essa razão, o preparo do solo é de fundamental importância para esta cultura, já que o mesmo será feito uma única

vez para todos os cortes, e deverá oferecer as melhores condições físico-hídricas para suportar o tráfego de máquinas durante o manejo da cultura, principalmente na época de colheita (ARCOVERDE, 2018).

## **2.2. Sistemas de preparo do solo**

É fundamental o conhecimento do clima e o potencial produtivo da região para fazer um planejamento agrícola adequado para o sucesso do plantio da cultura de cana-de-açúcar, assim como a qualidade do solo e os recursos disponíveis para atingir os valores desejados para uma boa produção. Solos com boa fertilidade, ou seja, boa qualidade química, podem ter seu potencial produtivo afetado pela sua qualidade física (SANTOS, 2013). Diferentes sistemas de preparo e manejo do solo alteram a sua estrutura, conseqüentemente, afetam aos atributos físicos, químicos e biológicos do mesmo (PEREIRA, 2014).

O preparo convencional do solo consiste em revolvimento de camada profunda do solo, para eliminação e incorporação de restos culturais, controle de pragas, expondo as mesmas a insolação, nivelamento ou destorroamento, por meio de aração e/ou gradagens (BARBOSA, 2013). Para o plantio de cana-de-açúcar é realizado o preparo convencional do solo, o qual consiste de aração e gradagens sucessivas, ocasionando mobilização e alterações na estrutura física do solo (ARCOVERDE, 2018; PRADO, 2015). Após essas etapas, é feita uma subsolagem para quebrar as camadas compactadas em profundidade, podendo ser substituída por escarificação, caso a camada compactada se localize a menos de 30 cm de profundidade (BARBOSA, 2013).

Existem práticas conservacionistas de manejo e conservação de solos, criadas para diminuir os efeitos da erosão e degradação dos solos, que por sua vez, são problemas que afetam a produtividade das plantas. Estas práticas conservacionistas têm como princípio a rotação de culturas, o não revolvimento do solo e por último o uso de cobertura vegetal, tendo o sistema de plantio direto como a prática conservacionista mais conhecida (SANTOS, 2013).

Estas práticas proporcionam melhores condições físicas, químicas e biológicas do solo para desenvolvimento das culturas. Entre os benefícios da implantação de sistemas conservacionistas, tem-se a redução das operações de preparo do solo, o não revolvimento do mesmo, manutenção de resíduos vegetais em superfície e diminuição do custo de produção da cultura de cana-de-açúcar (ARCOVERDE, 2018). Klein e Klein

(2015) constataram que o uso de práticas conservacionistas de solo, como uso de cobertura de solo e escarificação no plantio direto favorecem ao crescimento e desenvolvimento da cultura de milho. Áreas cultivadas em plantio direto, juntamente com rotação de culturas apresentam valores maiores de retenção de água em potenciais elevados (TORMENA et al., 2007).

O plantio direto é grandemente utilizado na produção de grãos, atualmente tem ganhado espaço na produção de cana-de-açúcar, consistindo em plantio mecanizado sobre a palhada, utilizando discos corta-palha na frente do sulcador, possibilitando o plantio direto em situações de até volumes elevados de palhada sobre a superfície do solo, é necessário verificar o estado de compactação do solo, para posteriormente proceder com uma subsolagem para quebra da camada compactada (BARBOSA, 2013)

Outro sistema de preparo conservacionista é o preparo reduzido ou cultivo mínimo, que consistem em uma técnica conservacionista que traz benefícios na otimização de recursos como também na redução de custos de produção na cultura de cana-de-açúcar (FORTES, 2010; ARCOVERDE, 2018). Para Barbosa (2013) o preparo reduzido consiste em diminuir ao máximo o número de operações realizadas no preparo convencional além de utilizar equipamentos mais leves. Porém, é fundamental a ausência de impedimentos físicos, químicos e biológicos no terreno a ser preparado, tais como, compactação, deficiência de calcário e pragas de solo.

### **2.3. Atributos físicos do solo**

A densidade do solo é definida como o resultado da divisão da massa de sólidos pelo seu volume, afetada por sistemas de manejo que alteram a sua estrutura (KLEIN, 2014). Cavalieri (2011) estudou os efeitos da densidade em três solos diferentes sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar, determinou que a densidade é um atributo importante necessário para avaliar a qualidade física do solo.

O conteúdo de água no solo na capacidade de campo e ponto de murcha permanente são fundamentais para o estudo da qualidade do solo, por afetarem diretamente ao desenvolvimento e crescimento da cultura. A porosidade do solo é definida como a fração volumétrica do mesmo que pode ser preenchida por água ou ar (KLEIN, 2014).

Finalmente a propriedade física de resistência mecânica do solo a penetração, que é a propriedade mecânica que limita o desenvolvimento das raízes (SEVERIANO,

2007). Pereira (2014), Prado (2015), Pellin (2017) consideram o conteúdo de água quando a resistência a penetração atinge 2,0 MPa como a resistência limitante para o crescimento das raízes da cana-de-açúcar, por outro lado, Ribeiro (2010) considerou críticos valores acima de 4,0 MPa.

O uso de sistemas intensivos de preparo do solo, sugere o revolvimento do solo, modificando sua estrutura física completamente (PRADO, 2015). Solos suscetíveis a compactação, como os Latossolos Vermelhos argilosos, quando inseridos em sistemas produtivos, tornam-se suscetíveis a processos de degradação, conseqüentemente, ocorrem alterações nos atributos físicos do solo (ARCOVERDE, 2018).

A porosidade de aeração, disponibilidade de água e resistência mecânica do solo a penetração das raízes, estão associados diretamente à condição estrutural do solo, submetido a um determinado sistema de manejo (SILVA et al. 2017; MELO, 2018). Arcoverde (2018) comenta que o aumento na densidade do solo, resistência do solo a penetração das raízes e a diminuição da macroporosidade do solo podem limitar a disponibilidade hídrica, de nutrientes e de aeração, causando restrições ao crescimento da planta.

Cavalieri et al. (2006) afirmaram que a densidade do solo e a resistência mecânica à penetração das raízes são influenciadas pelos sistemas de preparo em Latossolo Vermelho Distrófico. Cunha et al. (2009) determinaram que quanto maior é a pulverização do solo, nas operações de preparo, maior será o grau de compactação do mesmo, sendo que a primeira passada da máquina é a que promove o maior nível de compactação, na camada superficial de 0 a 20 cm.

#### **2.4. Intervalo hídrico ótimo**

Trabalhos com água no solo foram realizados na primeira metade do século XX, nos quais acreditava-se que toda a água que se encontrava entre a capacidade de campo (tensão matricial de -0,006 MPa) e o ponto de murcha permanente (tensão matricial -1,5 MPa) estava totalmente disponível para a planta, ou seja, significando a condição ideal do solo para o seu desenvolvimento (VEIHMEYER et al., 1927). Posteriormente, determinou-se que nem toda a água dentro deste intervalo estava disponível para a planta, devido a efeitos na estrutura física do solo, como densidades elevadas que representavam indícios de compactação no solo, o que dificulta o

crescimento das raízes devido à diminuição dos macroporos, da aeração, e dificuldade de penetração pelas raízes (BOONE et al., 1987).

Solos levemente compactados podem apresentar condições favoráveis para a formação e crescimento de raízes (PHENE et al., 1976). Mais tarde, Letey (1985) introduziu o conceito de uma única variável que mostra a interação entre o desenvolvimento das raízes da planta no solo e os atributos físicos do solo: “Non Limiting Water Range” (NLWR). O NLWR é uma faixa de água não limitante, entre a umidade na capacidade de campo e a umidade no ponto de murcha permanente, na qual os efeitos de densidade do solo, porosidade de aeração e resistência à penetração geram baixas limitações. Essa faixa representa o intervalo hídrico ótimo (IHO), a mesma tem limites superiores e inferiores, em que dentro destes limites a planta apresenta ótimo desenvolvimento, conseqüentemente, fora dos limites a planta apresenta restrições ao seu crescimento. Silva et al. (1994) propõe o IHO como um indicador de qualidade do solo para crescimento da planta.

Desta forma, a utilização do IHO se destaca por avaliar a qualidade físico-hídrica do solo, assim como a sua estrutura, estabelecendo os parâmetros limitantes de umidade para o melhor desenvolvimento da cultura. O IHO associa a resistência mecânica do solo à penetração das raízes, a porosidade de aeração do solo e o efeito do potencial matricial da água no solo (SILVA et al., 1994).

Para Prado (2015), Leon (2016) e Melo (2018), o IHO é um indicador que melhor representa a qualidade física e estrutural de solo, uma vez que o mesmo é correlacionado com o crescimento da planta apresentando resultados satisfatórios, em solos cultivados com cana-de-açúcar.

Silva (2003), Cavalieri et al. (2006) e Tormena et al. (2007) comprovaram que o aumento da densidade afeta diretamente aos valores de resistência mecânica a penetração das raízes, conseqüentemente, o IHO apresenta diminuição na faixa de disponibilidade hídrica. Posteriormente, Prado (2015) corroborou que o aumento da densidade do solo provoca uma diminuição na fração do IHO, conseqüentemente há aumento nas restrições físicas, afetando diretamente ao desenvolvimento e produtividade da cana-de-açúcar resultados similares aos obtidos por (SEVERIANO, 2007).

A densidade crítica é aquela na qual os limites do IHO coincidem em um único ponto, obtendo valor de IHO nulo, em que as limitações para crescimento das plantas de cana-de-açúcar são extremamente elevadas (LEON, 2016).

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1. Local**

O trabalho foi desenvolvido nos Laboratórios de Projeto de Máquinas da Faculdade de Ciências Agrárias e de Sistemas Integrados de Produção de Oleaginosas da UFGD. O experimento onde foram coletadas as amostras de solo para avaliação dos atributos físicos está localizado na Fazenda Experimental da UFGD, situada no município de Dourados, MS (22° 13' 58" S, 54° 59' 57" W", e altitude 418 m).

O clima é do tipo Am monçônico, com inverno seco, precipitação média anual de 1500 mm e temperatura média de 22°C (ALVARES et al., 2013). O solo da área é classificado como Latossolo Vermelho Distroférrico, textura argilosa, tendo na camada até 0,30 m de profundidade 603 g kg<sup>-1</sup> de argila, 147 g kg<sup>-1</sup> de silte e 250 g kg<sup>-1</sup> de areia.

#### **3.2. Delineamento**

Na área experimental foram cultivadas oito cultivares de cana-de-açúcar (RB965902, RB985476, RB966928, RB855156, RB975201, RB975242, RB036066 e RB855536) em delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições. Cada unidade experimental foi de 37,5 m<sup>2</sup>, com as linhas de plantio de cana espaçadas de 1,50 m, num total de 32 unidades experimentais por cada preparo do solo.

#### **3.3. Preparo do solo, plantio, tratos culturais**

As cultivares de cana-de-açúcar foram plantadas manualmente em duas áreas adjacentes, uma sob preparo reduzido do solo e outra sob plantio direto. O Preparo Reduzido consistiu de gradagem pesada com grade aradora do tipo off-set, arrastada, com 16 discos de 0,76 m de diâmetro (30") em cada seção, na profundidade de 0,15 m.

O Plantio Direto consistiu de preparo mecanizado (trituração) das plantas daninhas e posteriormente abertura dos sulcos para o plantio manual. Foi utilizado triturador de palhas equipado com rotor de facas curvas de aço que trabalham em alta rotação e sulcador.

Para as operações de preparo do solo e sulcação direta, foi utilizado o trator 4x2 TDA New Holland, modelo 8030 de potência no motor de 89,79 kW (122 cv), rotação de 2200 rpm, 3ª marcha reduzida, pneus dianteiros 14.9-28'' e traseiros 23.1-30'', e massa de 4,51 Mg.

Para a cobertura dos sulcos e tratos culturais (180 dias após o plantio) foi utilizado o trator 4x2 TDA Massey Ferguson, modelo MF292 de potência no motor 68,74 kW (92 cv), rotação de 2200 rpm, 3ª marcha reduzida, pneus dianteiros 7.50-18'' e traseiros 18.4-34'', e massa de 3,40 Mg; e pulverizador KO Cross-s 2000, pneus 9.5-24'', 14 m de barra e massa de 1,40 Mg.

### 3.4. Equipamentos e métodos

Para avaliar o conteúdo de água e a densidade do solo (Ds) foi utilizado o método do cilindro volumétrico, usando uma estufa de circulação de ar forçada (Figura 1A) e uma balança de precisão de 0,01g de resolução (Figura 1B).

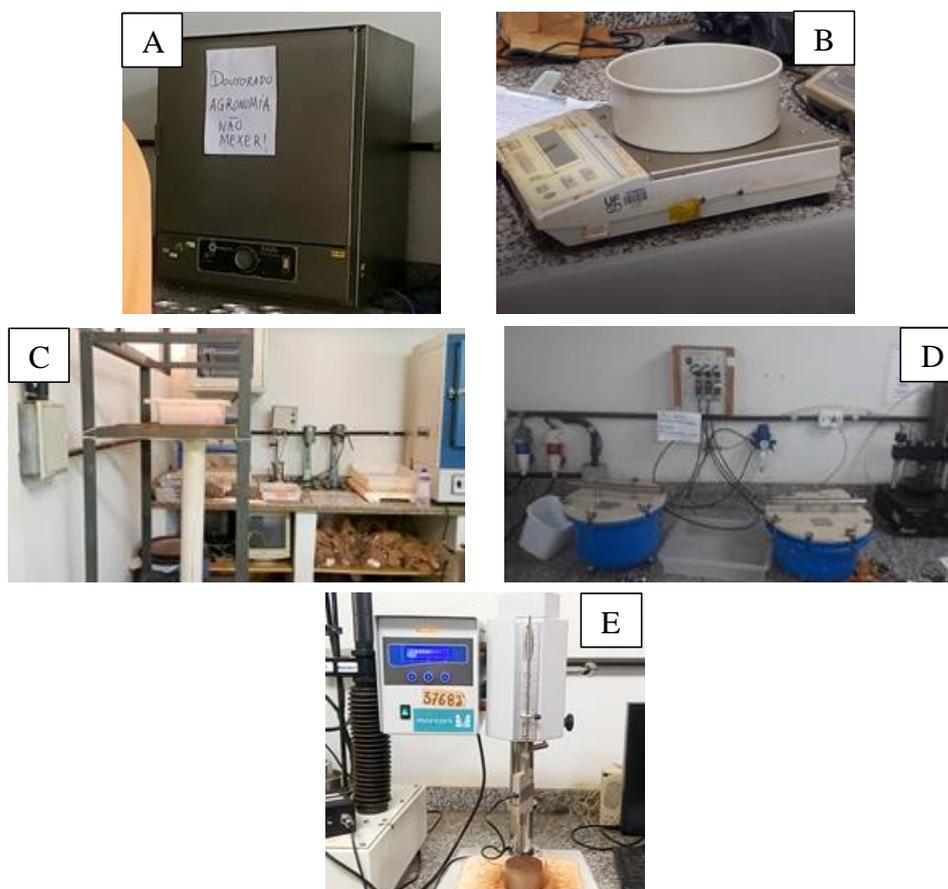


FIGURA 1. A: Estufa de circulação de ar forçada; B: Balança de precisão; C: Mesa de tensão; D: Câmaras de Richards; E: Penetrógrafo eletrônico de bancada.

Para a determinação do conteúdo de água e da resistência do solo à penetração (RP) foram utilizados: mesa de tensão (-0,006 MPa) (Figura 1C), câmara de Richards (Figura 1D), penetrógrafo eletrônico modelo MA-933, com velocidade constante de penetração de 10 mm min<sup>-1</sup>, diâmetro de base da haste de 4 mm e ponta cônica angular a 30°, conforme padronização pela ASABE (ASABE, 2006) (Figura 1E).

### **3.5. Coleta de amostras**

Em ciclo de cana de primeira soca, foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada para determinação do conteúdo de água, densidade do solo e resistência do solo à penetração. Foram abertas trincheiras no sentido perpendicular às linhas do plantio e retiradas as amostras em duas camadas, uma de 0,00-0,10 m e outra de 0,10-0,20 m, centradas nas profundidades de 0,05 e 0,15 m, respectivamente, entre a linha e a entrelinha da cana-de-açúcar.

Foi realizada aleatoriamente a coleta das amostras de solo com estrutura preservada na área experimental, utilizando anéis volumétricos de bordas cortantes de 107,5 cm<sup>3</sup> com diâmetro de 5,57 m e altura de 4,41 m, em cada sistema de preparo do solo.

Posteriormente, para a determinação do conteúdo de água na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente nos dois sistemas de preparo do experimento, foi realizada amostragem de solo com estrutura preservada utilizando anéis volumétricos de 83 cm<sup>3</sup>, diâmetro de 6,45 cm e altura de 2,54 cm, na entre linha de plantio.

Em cada preparo do solo as amostras de solo foram coletadas em 7 amostras, sendo em cada ponto coletadas 5 pontos em cada profundidade, totalizando 70 amostras por tratamento (35 amostras em cada profundidade), num total de 140 amostras.

As amostras foram envolvidas em papel filme e acondicionadas em geladeira para evitar alterações das condições de origem da amostragem, minimizando variações da estrutura e condição hídrica.

### **3.6. Determinação dos atributos físico-hídrico-mecânicos**

#### **3.6.1. Densidade e Porosidade total do solo**

A porosidade total do solo foi obtida pela diferença entre a massa do solo saturado e a massa do solo seco em estufa a 110 °C, durante 24 h (DONAGEMA et al., 2011). A densidade do solo foi calculada pela relação entre a massa de solo seco a 110°C

durante 24 h e o volume do anel volumétrico no qual o solo foi coletado (DONAGEMA et al., 2011).

### **3.6.2. Conteúdo de água do solo**

As amostras de solo com estrutura preservada foram encaminhadas ao Laboratório de Física de Solo da Faculdade de Ciências Agrárias da UFGD, e submetidas à saturação por meio da elevação gradual de uma lâmina de água até atingirem cerca de dois terços da altura do anel volumétrico para posterior estabilização do conteúdo de água. As amostras de cada tratamento (de cada camada) foram divididas em 7 grupos de 5 amostras, sendo cada grupo submetido aos seguintes potenciais matriciais: -0,006; -0,01; -0,033; -0,066; -0,1; -0,3 e -1,5 MPa, utilizando mesa de tensão (-0,006 MPa) e câmara de Richards para os demais potenciais, conforme Prado (2015).

### **3.6.3. Resistência mecânica do solo à penetração das raízes**

Ao atingir o equilíbrio na tensão correspondente, a resistência do solo à penetração (RP) foi determinada, por meio de penetrógrafo eletrônico com velocidade constante de penetração de 1 cm min<sup>-1</sup>, diâmetro de base da haste de 4 mm e semiângulo de 30°. As amostras obtidas nos 5 mm superiores e inferiores da amostra foram descartadas, visando eliminar o efeito da periferia da amostra. A frequência de leituras de RP correspondeu à coleta de um valor a cada 0,25 s, obtendo-se 800 leituras por amostra, sendo utilizado o valor médio (ARCOVERDE, 2018).

## **3.7. Intervalo Hídrico Ótimo**

O IHO foi determinado a partir dos procedimentos descritos em Bergamin (2012). Os valores críticos de conteúdo de água associados com potencial matricial, resistência do solo à penetração das raízes e porosidade de aeração do solo, representados, pelo conteúdo de água na capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ), potencial de -0,01 MPa (REICHARDT, 1988); pelo conteúdo de água no ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ), com potencial de -1,5 MPa (SAVAGE et al., 1996); pelo conteúdo de água volumétrico em que a resistência do solo à penetração das raízes ( $\theta_{RP}$ ) chega a 2,0 MPa (TAYLOR et al., 1966) e 4,0 MPa para a cultura de cana-de-açúcar (RIBEIRO, 2010); e pelo conteúdo

de água volumétrico no qual a porosidade de aeração ( $\theta_{PA}$ ) é de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (GRABLE e SIEMER, 1968).

Os valores de  $\theta_{CC}$  e  $\theta_{PMP}$  foram determinados utilizando o modelo matemático da Equação 1, proposto por Silva et al. (1994), os dados originais foram ajustados, para isto se incorporou a variável densidade do solo na função empregada por Ross et al. (1991).

$$\theta = \exp^{(a+bD_s)}(\psi^c) \quad (1)$$

em que,

$\theta$  - conteúdo de água do solo,  $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ;

$D_s$  - densidade do solo,  $\text{Mg m}^{-3}$ ;

$\psi$  - potencial matricial do solo, MPa;

a, b, c - parâmetros empíricos de ajuste do modelo.

Os valores de RP de todas as amostras com  $\theta$  e  $D_s$  conhecidas foram ajustados matematicamente, utilizando o modelo proposto por Busscher (1990), conforme a Equação 2. Por meio dessa equação foi possível determinar o valor crítico de  $\theta$  para que a RP não ultrapassasse 2,0 e 4,0 MPa ( $\theta_{RP}$ ), em função da  $D_s$ . Para isso, substitui-se RP na equação pelo valor de 2,0 e 4,0 MPa, considerado como inicialmente e totalmente limitante para efeito de cálculo do IHO, respectivamente.

$$RP = d\theta^e D_s^f \quad (2)$$

em que,

RP - resistência do solo à penetração, MPa;

$\theta$  - conteúdo de água do solo,  $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ;

d, e, e f - são os parâmetros empíricos de ajuste do modelo.

O valor de  $\theta_{PA}$  foi obtido aplicando a Equação 3.

$$\theta_{PA} = (1 - (D_s/D_p)) - 0,10 \quad (3)$$

em que,

$\theta_{PA}$  - conteúdo de água volumétrico do solo em que a porosidade de aeração é de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ;

$D_p$  - densidade de partículas ( $\text{Mg m}^{-3}$ ), sendo adotado o valor de  $2,65 \text{ Mg m}^{-3}$  como densidade média de partículas (BERGAMIN, 2012).

Na determinação dos limites superiores do IHO, foi considerado o  $\theta_{CC}$ , e a  $\theta_{PA}$  considerada adequada ao crescimento e desenvolvimento da cana. Como limites inferiores foram considerados o  $\theta_{PMP}$  e a  $\theta_{RP}$  limitante ao crescimento e desenvolvimento das plantas, conforme descrito em Dias et al. (2016). Após o cálculo dos limites superiores e inferiores do IHO, foi determinado a densidade crítica do solo (Dsc), que é a densidade do solo em que o IHO se iguala a zero, ou seja, quando o limite superior do IHO equivale numericamente ao limite inferior (SILVA et al., 1994).

### **3.8. Análises estatísticas**

Os dados foram submetidos a estatísticas descritivas visando verificar a médias, desvio padrão, valores mínimo e máximos, e coeficiente de variação. Para determinar os coeficientes dos modelos matemáticos foi aplicada a análise de regressão linear, onde somente foram selecionados os modelos com mais de 60% de coeficiente de determinação, com significância do teste t dos coeficientes a 5% de probabilidade e com significância do teste F a 5% de probabilidade.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No Quadro 1 estão apresentados os dados dos atributos hidro-físico-mecânicos obtidos em solo cultivados com cana-de-açúcar e submetidos a dois tipos de preparos do solo, em duas camadas de profundidades. Observa-se que houve grande amplitudes dos dados de densidade, conteúdo de água e resistência do solo à penetração, refletindo a falta de revolvimento do solo durante a implantação da cana e o efeito intensivo da mecanização da cana nos dois primeiros anos de cultivos. Os valores médios da porosidade total se apresentaram próximos aos resultados obtidos por Arcoverde (2018). Buscou-se selecionar modelos capazes de explicar o comportamento do conteúdo de água e da resistência à penetração em cada camada, como também conjuntamente nas duas camadas visando encontrar as melhores opções de modelos.

QUADRO 1. Estatística descritivas dos atributos físicos do solo determinadas nas amostras com estrutura indeformada para estudo do intervalo hídrico ótimo dado o conteúdo de água, a densidade e a resistência do solo à penetração, obtidos em duas camadas do solo sob plantio direto e preparo reduzido

Variável	Média	Desvio-padrão	CV	Mínimo	Máximo
----- Plantio direto e profundidade de 0-10 cm -----					
Ds	1,528	0,197	12,8	1,192	1,767
$\theta$	0,368	0,059	16,2	0,249	0,451
RP	3,272	2,356	72,0	0,477	10,54
PA	0,423	0,198	12,8	0,333	0,550
----- Plantio direto e profundidade de 10-20 cm -----					
Ds	1,553	0,069	4,4	1,417	1,657
$\theta$	0,399	0,053	13,3	0,223	0,484
RP	4,340	2,400	55,3	0,540	11,09
PA	0,414	0,070	4,4	0,375	0,465
----- Preparo reduzido e profundidade de 0-10 cm -----					
Ds	1,549	0,140	9,0	1,202	1,747
$\theta$	0,375	0,045	12,1	0,274	0,451
RP	4,000	2,010	50,4	0,936	9,670
PA	0,415	0,140	9,0	0,341	0,546
----- Preparo reduzido e profundidade de 10-20 cm -----					
Ds	1,594	0,100	6,3	1,368	1,764
$\theta$	0,404	0,027	6,7	0,337	0,444
RP	3,898	1,410	36,2	1,467	8,288
PA	0,398	0,100	6,4	0,334	0,484

Ds - densidade do solo ( $\text{Mg m}^{-3}$ );  $\theta$  - conteúdo de água no solo ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ); RP - resistência do solo à penetração (MPa); PA - porosidade de aeração ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ); CV - coeficiente de variação (%).

A densidade e o conteúdo de água do solo apresentaram baixos valores de coeficiente de variação (CV), enquanto a resistência do solo à penetração apresentou altos valores. Os valores de CV elevado para resistência a penetração são similares aos encontrados por Silva et al. (1994), Tormena et al. (1998), Leão (2002) e Leão et al. (2004), isto deve-se a variabilidade de  $\theta$  e de  $D_s$  nas amostras. Os máximos valor de RP foi de 11,09 MPa, resultados semelhantes comparados com os valores obtidos por Tormena et al. (2007) em Latossolos Vermelhos Distroférico, em sistemas de plantio direto. A densidade do solo e a retenção de água no solo apresenta semelhança com Leão (2002) e Serafim (2008), que trabalharam com Latossolo Vermelho Distroférico.

No Quadro 2 estão apresentados os coeficientes dos modelos obtidos para o conteúdo de água em função da densidade e do potencial matricial do solo, para amostragem feitas nos dois preparos e nas camadas. Observa-se que todos os modelos foram significativos pela análise de variância da regressão ( $p < 0,01$ ) e quase todos os coeficientes foram significativo pelo teste t ( $p < 0,01$ ), exceto para a camada de 10-20 cm, onde não houve efeito significativo da densidade e do potencial matricial do solo no modelo, para o preparo reduzido e plantio direto, respectivamente.

QUADRO 2. Coeficientes e resumo da análise do modelo de regressão usado para estimar o conteúdo da água do solo ( $m^3 m^{-3}$ ) em função da densidade ( $Mg m^{-3}$ ) e do potencial matricial (MPa):  $\theta = e^{(a + b \cdot D_s)}(\psi^c)$

Manejo do solo	Coeficientes			R <sup>2</sup>	Sig. F
	a	b	c		
Plantio direto (0-10cm)	-1,96851	0,50642**	-0,06688**	0,90	0,001
Plantio direto (10-20cm)	-1,56691	-1,64858**	-0,023865	0,70	0,1
Preparo reduzido (0-10cm)	-1,91988	0,50099**	-0,057611**	0,89	0,001
Preparo reduzido (10-20cm)	-0,68194	-0,182697	-0,023998**	0,82	0,001
Plantio direto (0-20cm)	-1,85186	0,46631**	-0,059918**	0,65	0,001
Preparo reduzido (0-20cm)	-1,65083	0,37191**	-0,043643**	0,65	0,001

\*\*Significativo a 1% de probabilidade, pelo teste t.

Analisando os valores dos coeficientes de determinação pode-se observar que os maiores valores foram obtidos para os modelos selecionados para descrever o conteúdo de água na camada de 0-10 cm nos dois preparos conservacionistas, seguidos pelos modelos da camada de 10-20 cm. Analisando os modelos selecionados para descrever o conteúdo de água na camada de solo de 0-20 cm, embora os modelos sejam todos válidos, os baixos valores de coeficiente de determinação demonstram dispersão dos dados em torno da curva estimada. Ainda assim optou-se por fazer o estudo usando conjuntamente

todos os dados obtidos nas duas camadas (0-20 cm), onde obteve-se significância pelo teste t dos coeficientes como também validade da regressão, pelo teste F.

Serafim et al. (2008) estudando um Latossolo Vermelho Distroférico sob diferentes manejos do solo também não usaram o modelo de Silva et al. (1994) para descrever o conteúdo de água. Esses autores propuseram um modelo alternativo, visto que não foi possível ajustar os coeficientes válidos para as situações encontradas em campo, demonstrando que pode haver comportamento diferentes devido ao tipo e ao manejo imposto ao solo.

Os modelos selecionados para explicar o comportamento da resistência do solo à penetração em função da densidade e do conteúdo de água estão apresentados no Quadro 3. Observa-se que todos os modelos são considerados válidos pela significância do teste F da regressão e pelo teste t dos coeficientes, exceto o coeficiente “e” no plantio direto a 0-10 cm, entretanto somente os valores de coeficientes de determinação dos modelos selecionados para representar a camada de 0-20 cm foram maiores que 0,6, mínimo aceitável adotado no trabalho.

QUADRO 3. Coeficientes e resumo da análise do modelo de regressão usado para estimar a resistência do solo a penetração em função da densidade ( $\text{Mg m}^{-3}$ ) e do conteúdo da água do solo ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ):  $\text{RP} = d\theta^e D_s^f$

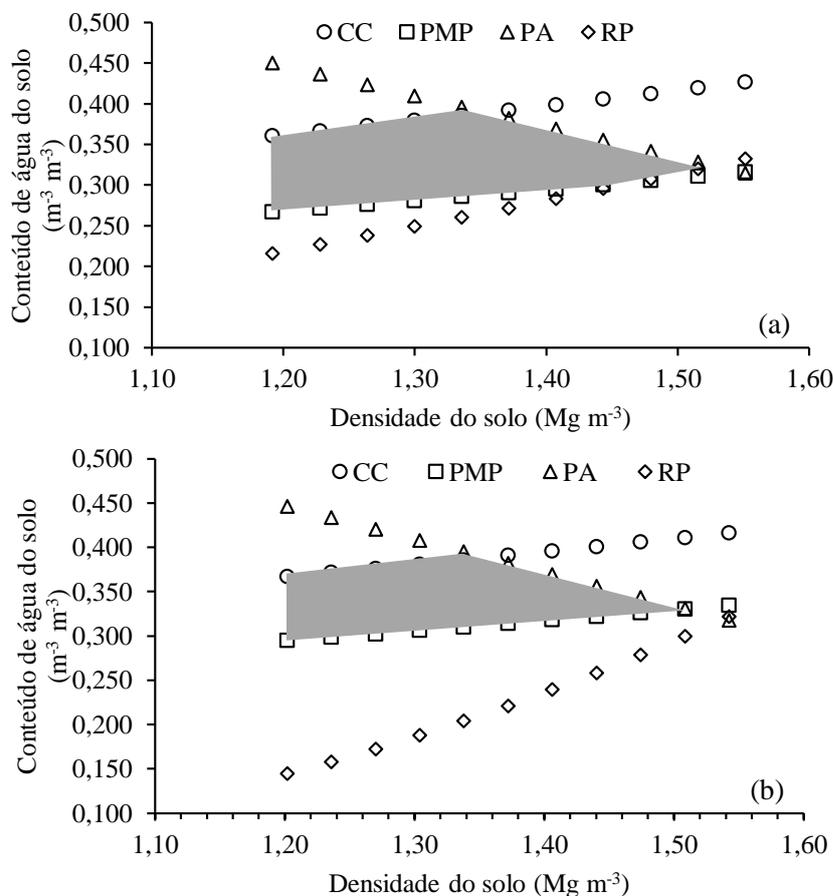
Variável	Coeficientes			R <sup>2</sup>	Sig. F
	d	e	f		
Plantio direto (0-10cm)	0,59196	0,82832	6,51412**	0,45	0,0001
Plantio direto (10-20cm)	1,40908	1,2093*	6,04926**	0,58	0,0001
Preparo reduzido (0-10cm)	16,5006	2,07302**	2,14129**	0,54	0,0001
Preparo reduzido (10-20cm)	3,5057	1,01518*	2,90082**	0,41	0,0001
Plantio direto (0-20cm)	$0,6469 \cdot 10^{-5}$	-7,3336**	11,965**	0,75	0,0001
Preparo reduzido (0-20cm)	0,019495	-2,10885**	6,77195*	0,65	0,0001

\*\* e \* Significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste t.

O intervalo hídrico ótimo (IHO) para os dois sistemas de preparo do solo e resistência à penetração considerada limitante de 4,0 MPa estão apresentados na Figura 2, representado pela área hachurada, em que conteúdos de água acima ou abaixo desta, representam condições limitantes ao desenvolvimento da planta, ou seja, a água se encontra com restrição de disponibilidade na camada de 0-20 cm (PEREIRA, 2014; LEON, 2016).

Observa-se que com o aumento da densidade do solo há um aumento do IHO, até o conteúdo de água na porosidade de aeração ( $\theta_{PA}$ ) substituir o conteúdo de água na

capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ), ou, a resistência mecânica à penetração das raízes substituir o conteúdo de água no ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ), semelhante aos dados obtidos por Betioli Junior (2012), Araújo et al. (2013) e Prado (2015).



CC-Capacidade de campo. PMP-ponto de murcha permanente. PA-porosidade de aeração. RP-resistência d solo à penetração. A área hachurada representa o intervalo hídrico ótimo do solo.

FIGURA 2. Conteúdo de água do solo em função da densidade nos níveis críticos da capacidade de campo ( $\psi=-0,01$  MPa), ponto de murcha permanente ( $\psi=-1,5$  MPa), porosidade de aeração de 10% e resistência à penetração de 4,0 MPa, em função da densidade de um Latossolo Vermelho Distroférico, (a) Plantio direto, (b) Plantio reduzido na camada de 0-20 cm.

De acordo com Serafim (2008), para sistemas conservacionistas a utilização do valor de 2,0 MPa como restritivo parece ser inadequado, devido a que as plantas buscam caminhos com menores restrições para o seu crescimento, e ressalta-se também que nesses sistemas costuma-se ter valores maiores de RP. Alguns autores estudaram o IHO com limites de RP diferentes a 2,0 MPa, entre eles, Tormena (1998), Klein e Camara (2007), Cavalieri et al. (2011), Betioli Junior et al. (2012) e Araújo et al. (2013). Ribeiro

(2010) corroborou que valores de RP menores que 4,0 MPa, não devem provocar prejuízos ao crescimento das plantas de cana-de-açúcar. Araújo (2013), constatou que, elevando-se o limite de RP para 4,0 MPa em Latossolo Vermelho, o IHO passaria a proporcionar melhores condições de representatividade para analisar o desenvolvimento da cana-de-açúcar.

Verificou-se que com o aumento da densidade do solo ocorre também aumento do IHO, para os dois sistemas de preparo do solo. No caso do sistema de Plantio Direto (Figura 2a) houve aumento do IHO até a  $\theta_{PA}$  substituir a  $\theta_{CC}$  na densidade de  $1,34 \text{ Mg m}^{-3}$ , e a  $\theta_{RP}$  substituir a  $\theta_{PMP}$ , na densidade de  $1,44 \text{ Mg m}^{-3}$ . No caso do plantio reduzido (Figura 2b), ocorreu aumento do IHO até a  $\theta_{PA}$  substituir a  $\theta_{CC}$  na densidade de  $1,34 \text{ Mg m}^{-3}$ , já o limite inferior foi representado totalmente pela  $\theta_{PMP}$ .

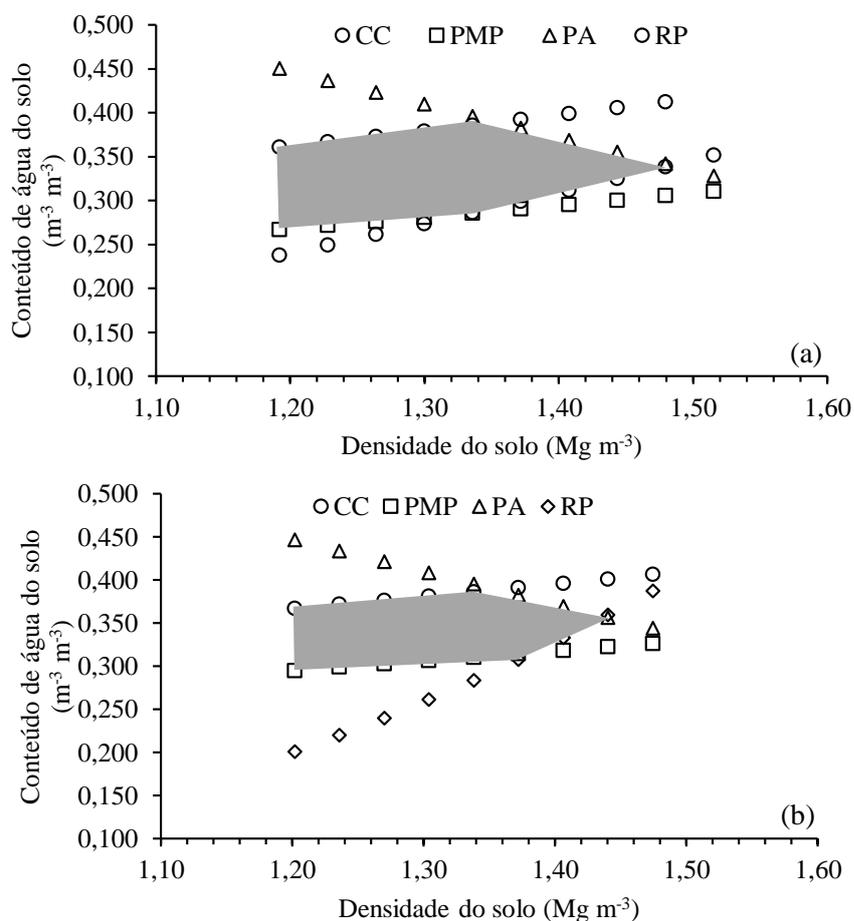
Na Figura 3 tem-se o IHO para os dois sistemas de preparo de solo e resistência à penetração considerada limitante de 2,0 MPa, representado pela área hachurada, observa-se a grande amplitude do conteúdo de água do solo, em que as limitações ao desenvolvimento da cana-de-açúcar são mínimas, em profundidades de 0-20 cm.

Pode-se verificar que com o aumento da densidade do solo ocorreu também aumento no IHO até certo ponto. Para o Plantio Direto (Figura 3a), o limite superior do IHO foi a  $\theta_{CC}$  até ser substituída pela  $\theta_{PA}$  na densidade de  $1,33 \text{ Mg m}^{-3}$ , e o limite inferior foi o  $\theta_{PMP}$  até ser substituído pela  $\theta_{RP}$  na densidade de  $1,34 \text{ Mg m}^{-3}$ . No caso do preparo reduzido (Figura 3b), o limite superior do IHO foi a  $\theta_{CC}$  até ser substituído pela  $\theta_{PA}$  na densidade  $1,34 \text{ Mg m}^{-3}$  e o limite inferior foi o  $\theta_{PMP}$  até ser substituído pela  $\theta_{RP}$  na densidade de  $1,37 \text{ Mg m}^{-3}$ .

Nota-se que no PD, o IHO começou a ser limitada pela  $\theta_{PMP}$ , na DS de  $1,34 \text{ Mg m}^{-3}$ , em ambos os preparos, o limite superior  $\theta_{CC}$  é substituída pela  $\theta_{PA}$ , e a  $\theta_{PMP}$  é substituída pela  $\theta_{RP}$ . Estes resultados estão de acordo com Pereira (2014), Prado (2015) e Pellin (2017) ao trabalharem com Latossolo Vermelho Distroférrico, de textura argilosa, e Araújo et al. (2013) em solo Latossolo Vermelho de características semelhantes.

A densidade crítica (Dsc) foi definida pela interseção da  $\theta_{PA}$  e  $\theta_{RP}$  em ambos os preparos, devido a que com o aumento da densidade há um aumento na  $\theta_{RP}$  e decréscimo da  $\theta_{PA}$ , este comportamento também foi encontrado em trabalhos feitos por diversos autores (BETIOLI JUNIOR, 2012; ARAÚJO et al. 2013; PEREIRA, 2014; PRADO, 2015; PELLIN, 2017). Observa-se que com o aumento da Ds, ocorre também um aumento

da RP. De acordo com Prado (2015), para manter a RP igual a 2,0 MPa é necessário aumentar o conteúdo de água do solo, para minimizar a maior fricção entre as partículas.



CC-Capacidade de campo. PMP-ponto de murcha permanente. PA-porosidade de aeração. RP-resistência d solo à penetração. A área hachurada representa o intervalo hídrico ótimo do solo.

FIGURA 3. Conteúdo de água do solo em função da densidade nos níveis críticos da capacidade de campo ( $\psi=-0,01$  MPa), ponto de murcha permanente ( $\psi=-1,5$  MPa), porosidade de aeração de 10% e resistência à penetração de 2,0 MPa, em função da densidade de um Latosolo Vermelho Distroférico, (a) Plantio direto, (b) Plantio reduzido na camada de 0-20cm.

A relação existente entre o IHO e a densidade do solo (Ds) está apresentada na Figura 4. O IHO aumenta com o incremento da densidade até valores de  $1,37 \text{ Mg m}^{-3}$  em PD e  $1,34 \text{ Mg m}^{-3}$  em PR, diminuindo seus valores depois dessa densidade, com RP crítica de 4,0 MPa. A densidade crítica para o PD foi de  $1,53 \text{ Mg m}^{-3}$  e para o PR foi de  $1,51 \text{ Mg m}^{-3}$ , que limitam a disponibilidade de água para as plantas.

Observa-se também, nos dois sistemas de preparo, para o plantio direto o aumento da densidade afetou positivamente ao IHO até a densidade de  $1,37 \text{ Mg m}^{-3}$ ,

valores de densidade superiores representaram em efeitos negativos para o IHO. Para PR, observa-se que a Ds afetou positivamente ao IHO até a densidade de  $1,33 \text{ Mg m}^{-3}$ , valores superiores de Ds representam em efeitos negativos para o IHO.

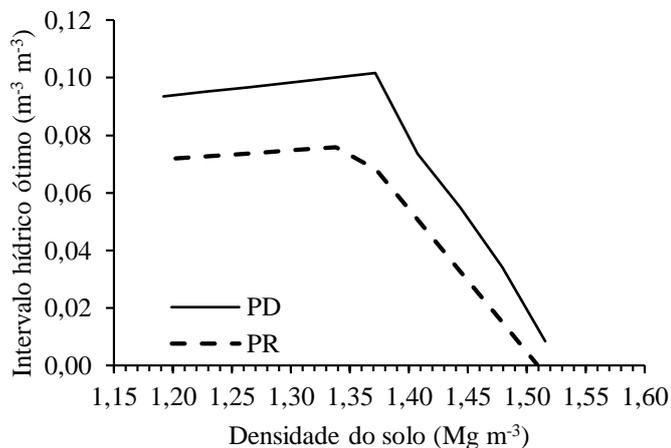


FIGURA 4. Intervalo hídrico ótimo em função da densidade do solo, para o plantio direto (PD) e o preparo reduzido (PR), sob resistência a penetração de  $4,0 \text{ MPa}$ , em função da densidade de um Latossolo Vermelho Distroférico na camada de 0-20 cm.

Na Figura 5 verifica-se o IHO nos dois sistemas de preparo do solo, para a RP crítica de  $2,0 \text{ MPa}$ . Observa-se que o aumento da densidade afetou positivamente ao IHO nos dois sistemas de preparo, até a densidade de  $1,34 \text{ Mg m}^{-3}$  para o PD e até  $1,37 \text{ Mg m}^{-3}$  para o PR, valores superiores acarretam em menores valores de IHO e maior restrição para as plantas. A Dsc foi de  $1,48 \text{ Mg m}^{-3}$  para PD, e  $1,51 \text{ Mg m}^{-3}$  para PR.

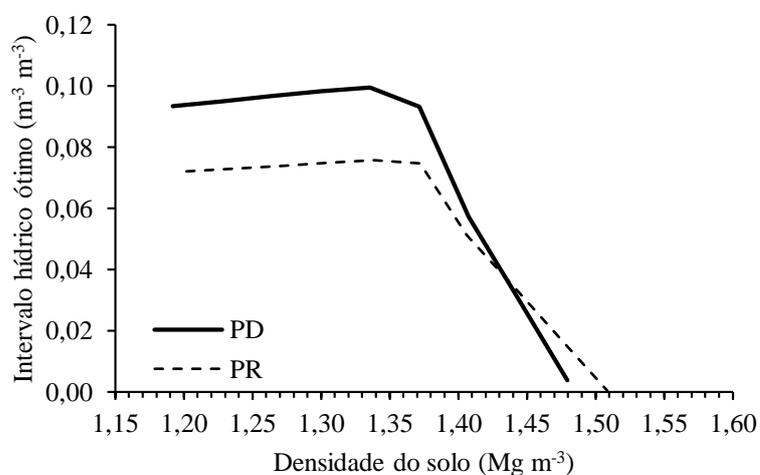


FIGURA 5. Intervalo hídrico ótimo em função da densidade do solo, para o plantio direto (PD) e o preparo reduzido (PR), sob resistência a penetração de  $2,0 \text{ MPa}$ , em função da densidade de um Latossolo Vermelho Distroférico na camada de 0-20 cm.

Pode-se observar que o IHO é maior no plantio direto tanto para a RP restritiva de 2,0 MPa quanto para 4,0 MPa. De acordo com Tormena et al. (1998), ao estudarem diferentes situações de IHO com RP de 1,5; 2,0 e 3,0 MPa, a RP foi o fator que assume maior importância em termos de limitações e crescimento das plantas. Porém, neste estudo a porosidade de aeração foi quem limitou em alguns casos. Klein et al. (2007) constatou que a RP de 2,0 MPa não deve ser assumida como limite ao desenvolvimento da soja, e que utilizando RP de 3,0 MPa ocorreu um melhor enquadramento dos limites. Betioli Junior et al. (2012) afirmaram que a utilização de RP maior que 2,0 MPa correlaciona de forma melhor o IHO com o desenvolvimento da cultura, ao estudar IHO com RP restritiva de 2,0; 3,0 e 4,6 MPa.

A Figura 6 representa a comparação do IHO quando se adota RP é igual a 2,0 ou 4,0 MPa em plantio direto, onde se observa que quando a RP é igual a 4,0 MPa, o solo se encontra com conteúdo de água maior que com 2,0 MPa, ou seja, a amplitude do IHO é quanto maior seja a o valor da RP restritiva.

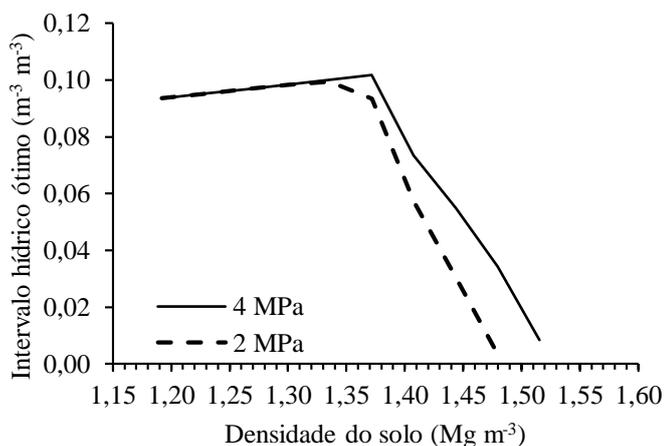


FIGURA 6. Intervalo hídrico ótimo em função da densidade do solo, para o plantio direto (PD), sob resistência à penetração de 2,0 MPa e 4,0 MPa, em função da densidade de um Latossolo Vermelho Distroférrico, na camada de 0-20 cm.

A Figura 7 apresenta a comparação do IHO quando a RP é igual a 2,0 MPa e 4,0 MPa, observa-se que em ambos os casos com o aumento da densidade a diminuição do IHO se dá na densidade de 1,36 Mg m<sup>-3</sup>, porém na RP igual a 4,0 MPa tem-se uma maior amplitude de retenção de água, até a densidade crítica de 1,51 Mg m<sup>-3</sup>.

Como pôde ser verificado pelo comportamento dos dados apresentados nas Figuras 6 e 7, a adoção de um valor restritivo da resistência do solo à penetração ao

desenvolvimento das plantas tem consequência direta sobre os resultados do IHO, demonstrando que tais valores devem ser muito bem estudados para que se tenha mais confiabilidade na tomada de decisão sobre o melhor manejo do solo para o cultivo da cana-de-açúcar.

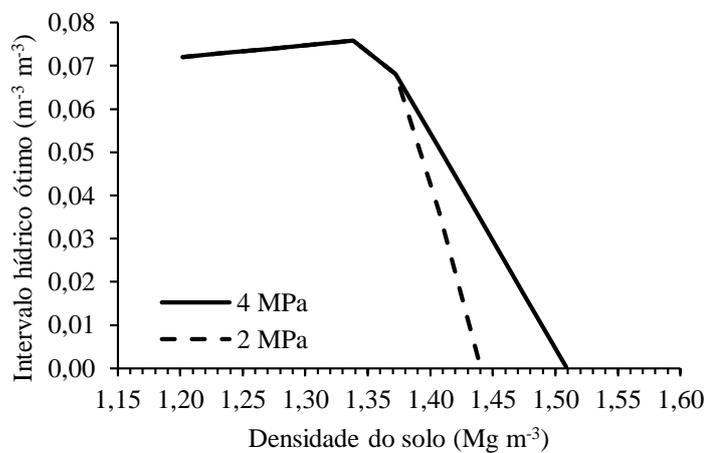


FIGURA 7. Intervalo hídrico ótimo em função da densidade do solo, para o plantio reduzido (PR), sob resistência a penetração de 2,0 MPa e 4,0 MPa, em função da densidade de um Latossolo Vermelho Distroférico na camada de 0-20 cm.

## 5. CONCLUSÕES

1. O intervalo hídrico ótimo demonstrou-se ser um bom indicador de qualidade físico-hídrica de solo cultivado com cana-de-açúcar sob os dois preparos conservacionistas.

2. O plantio direto apresentou maior amplitude do intervalo hídrico ótimo quando comparado com o preparo reduzido, independentemente do valor de resistência do solo à penetração adotado como restritivo ao desenvolvimento da cana-de-açúcar.

3. A densidade crítica do solo manejado com o Plantio Direto de cana está entre 1,48 e 1,53 Mg m<sup>-3</sup> para resistências à penetração de 2 e 4 MPa, enquanto que quando manejado com preparo reduzido está entre 1,44 e 1,51 Mg m<sup>-3</sup>.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARES, C.A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v.22, n.6, p.711-728, 2013.

ARCOVERDE, S. N. S. **Atributos físicos e desempenho de cultivares de cana-de-açúcar em um Latossolo Vermelho Distroférico submetido a dois sistemas de preparo**. 2018. 136f. Tese (Doutorado em Agronomia – Produção Vegetal) – Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD, Dourados.

ARAÚJO, F. S.; SOUZA, Z. M.; SOUZA, G. S.; MATSURA, E. E.; BARBOSA, R. S. Espacialização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho em dois sistemas de colheita de cana-de-açúcar. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v.48, n.6, p. 651-660, 2013.

ASABE. AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. Soil cone penetrometer. Saint Joseph, 2006b. p.902-904. (ASABE standard: ASAE S313.3 FEB04).

BARBOSA, V. F. A. M. Sistemas de plantio. In: SANTOS, F. A.; BORÉM, A. **Cana-de-açúcar do plantio à colheita**. 1. Ed. Viçosa, 2013. v. 1, p. 27-48.

BERGAMIN, A.C. **Indicadores da qualidade estrutural de um latossolo cultivado com oleaginosas em sistema de sucessão com soja e milho**. 2012. 124f. Tese (Doutorado em Agronomia – Produção Vegetal) – Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD, Dourados.

BETIOLI JÚNIOR, E.; MOREIRA W. H; TORMENA, C. A.; FERREIRA, C. J. B, SILVA, A. P.; GIAROLA, N. F. B. Intervalo Hídrico Ótimo e Grau de Compactação de um Latossolo Vermelho Após 30 Anos Sob Plantio Direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 3, p. 971-982, 2012.

BOONE, F.R.; Van der WERF, H.M.G.; KROESBERGEN, B.; TENHAG, B.A.; BOERS, A. The effect of compaction of the arable layer in sandy soils on the growth of maize for silage. II. Soil conditions and plant growth. **NetherlandS Journal of Agricultural Science**, v.35, n. 2, p.113-128, 1987.

BUSSCHER, W.J. Adjustment of that-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **Transactions of the ASAE**, Michigan, v.33, n.2, p.519-524, 1990.

CAVALIERI, K.M.V.; TORMENA, C.A., VIDIGAL FILHO, P.S., GONÇALVES, A.C.A., COSTA, A.C.S., Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um latossolo vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, n.1, p.137-147, 2006.

CAVALIERI, K. M. V.; CARVALHO, L. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L.; TORMENA, C. A. Qualidade física de três solos sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 5, p. 1541-1550. 2011.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar. Safra 2018/2019, Segundo levantamento.** v.5, 86p., Agosto/2018. Disponível em: [https://www.conab.gov.br/component/k2/item/download/21872\\_cd28fcd806c56cdbea0177a005de4399.pdf](https://www.conab.gov.br/component/k2/item/download/21872_cd28fcd806c56cdbea0177a005de4399.pdf). Acesso em: 30 de setembro de 2018.

CUNHA, J. P. A. R.; CASCAO, V. N.; REIS, E. F. Compactação causada pelo tráfego de trator em diferentes manejos de solo. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 31, n. 3, p. 371-375, 2009.

DIAS, C.B.; ROCHA, G.C.; ASSIS, I.R.; FERNANDES, R.B.A. Intervalo hídrico ótimo e densidade crítica de um Latossolo Amarelo coeso sob diferentes usos no ecossistema Tabuleiro Costeiro. **Revista Ceres**, v.63, n.6, p.868-878, 2016.

DONAGEMA, G.K.; CAMPOS, D.V.B.de; CALDERANO, S.B.; TEIXEIRA, W.G.; VIANA, J.H.M. (Org.). **Manual de métodos de análise de solos.** 2.ed. rev. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230p. (Embrapa Solos. Documentos, 132).

FORTES, C. **Produtividade de cana-de-açúcar em função da adubação nitrogenada e decomposição da palhada em ciclos consecutivos.** 2010. 153f. (Doutor em ciências – Energia nuclear na agricultura e no ambiente) – Universidade de São Paulo – USP, Piracicaba.

GRABLE, A.R.; SIEMER, E.G. Effects of bulk density aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.32, n.2, p.180-186, 1968.

LAPEN, D.R.; TOPP, G.C.; GREGORICH, E.G.; CURNOE, W.E. Least limiting water range indicators of soil quality and corn production, Eastern Ontario, Canada. **Soil and Tillage Research**, v.78, n. 2, p.151-170, 2004.

LEÃO, T. P. **Intervalo hídrico ótimo em diferentes sistemas de pastejo e manejo da pastagem.** 2002. 58f. Tese (Mestrado em agronomia – Solos e nutrição de plantas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ, Piracicaba.

LEÃO, T. P.; SILVA, A. P.; MACEDO, M. C. M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V. P. B. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 3, p.415-423, 2004.

LEON, H. N. **Qualidade física do solo e produtividade da cana-de-açúcar sob sistemas de preparo do solo.** 2016. 120f. Tese (Mestre em agronomia – Ciência do solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRP, Recife.

LETEY, J. Relationship between Soil Physical Properties and Crop Production. **Relationship between Soil Physical Properties and Crop Production**, v. 9, p 277-294, 1985.

MELO, N. C. **Atributos físicos do solo, crescimento e produtividade de cana-de-açúcar em solos submetidos à escarificação.** 2018. 58f. Tese (Doutorado em agronomia – Ciência do solo) – Universidade Estadual Paulista – UNESP, Jaboticabal.

KLEIN, V. A.; CAMARA, R. K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em latossolo vermelho sob plantio direto escarificado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n.2, p.221-227, 2007.

KLEIN, V. A. Água no solo disponível às plantas. In: KLEIN, V. A. **Física do solo**. 3. Ed. Passo Fundo, 2014. v. 1, p. 177-200.

KLEIN, V. A. Estrutura do solo. In: KLEIN, V. A. **Física do solo**. 3. Ed. Passo Fundo, 2014. v. 1, p. 40-55.

KLEIN, C.; KLEIN, V. A. Least limiting water range under no-tillage system and maize grain yield. **Científica**, Jaboticabal, v.43, n.2, p.179-187, 2015.

PELLIN, D. M. P. **Níveis de palhço e qualidade físico-hídrica de um latossolo vermelho cultivado com cana-de-açúcar**. 2017. 72f. Tese (Doutorado em agronomia – Produção vegetal) - Universidade Feredal da Grande Dourados, UFGD, Dourados.

PEREIRA, F.S.; ANDRIOLI, I.; BEUTLER, A. N.; ALMEIDA, C. X.; PEREIRA, F.S. Physical quality of an Oxisol cultivated with maize submitted to cover crops in the pre-cropping period. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 1, p. 211-217, 2010.

PEREIRA, A. H. F. **Atributos físicos do solo sob tipos de transbordos em colheita mecanizada de cana crua**. 2014. 54f. Dissertação (Mestrado em agronomia – Produção vegetal) – Universidade Feredal da Grande Dourados, UFGD, Dourados.

PHENE, C.J; BEALE, O.W. High-frequency Irrigation for Water Nutrient Management in Humid Regions. **Soil Science Society of America Journal Abstract**. v. 40, n. 3, p. 430-436, 1976.

PORTUGAL, A. F.; FONTES, L.E.F.; LANI, J. L.; SCHAEFER, C.E.R.G.; FERNANDES FILHO, E. I. Alterações em propriedades físicas do solo em ecossistemas de floresta após a implantação de pastagem no extremo oeste do Acre. In: ARAÚJO, E.A.; LANI, J.L. **Uso sustentável de ecossistemas de pastagens cultivadas na Amazônia Ocidental**. v., p. 63-74, 2012.

PRADO, E. A. F. **Qualidade física promovida por manejos de solo e espécies na renovação do canavial**. 2015. 94f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2015.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.12, n.13, p.211-216, 1988.

RIBEIRO, C. A. **Variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração em áreas mecanizadas de cana-de-açúcar (saccharum officinarum)**. 2010. 69 f. Tese (Mestrado em agronomia – Ciência do solo) – Universidade Estadual Paulista – UNESP, Jaboticabal.

ROQUE, A. A.O.; SOUZA, Z. M.; ARAUJO, F. S., Atributos físicos do solo e intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distrófico sob controle de tráfego agrícola. **Revista Ciência Rural**, v.41, n. 9, p. 1536-1542, 2011.

ROSS, P.J.; WILLIAMS, J.; BRISTOW, K.L. Equations for extending water-retention curves to dryness. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.55, n.4, p.923-927, 1991.

SANTOS, F. A; MARGARIDO, F. B.; Planejamento da lavoura. In: SANTOS, F. A.; BORÉM, A. **Cana-de-açúcar do plantio à colheita**. 1. Ed. Viçosa, 2013. v. 1, p. 9-26.

SAVAGE, M.J.; RITCHIE, J.T.; LAND, W.L.; DUGAS, W.A. Lower limit of soil water available. **Agronomy Journal**, Madison, v.88, n.5, p.844-851, 1996.

SEVERIANO, E. C. **Indicadores de qualidade estrutural na avaliação da compactação do solo em decorrência da colheita mecanizada da cana-de-açúcar**. 2007. 71f. Dissertação (Mestrado em agronomia – Ciência do solo) – Universidade Federal de Lavras – UFLA, Lavras.

SERAFIM, M. E.; VITORINO, A. C. T.; PEIXOTO, P. P. P.; SOUZA, C. M. A.; CARVALHO, D. F. Intervalo hídrico ótimo em um latossolo vermelho distroférico sob diferentes sistemas de produção. **Engenharia Agrícola**, v. 28, n. 4, p. 654-665, 2008.

SILVA, A.P.; KAY, B.D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range of soils. **Soil Science Society of America Journal**. v.58, n.6, p.1775-1781, 1994.

SILVA, L. F. S.; MARINHO, M. A.; BOSCHI, R. S.; MATSURA, E. E. Intervalo hídrico ótimo para avaliação de sistemas de produção e rendimento do feijão. **Irriga**, Botucatu, v. 22 n. 2, p. 383-399. 2017.

SILVA, V. R. **Propriedade físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação**. 2003. 171f. Tese (Doutorado) Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Santa Maria.

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

TORMENA, C. A.; ARAÚJO, M. A.; FIDALSKI, J.; COSTA, J. M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um latossolo vermelho distroférico sob sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 211-219, 2007.

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

ÚNICA, **A bioeletricidade em números**, São Paulo, Disponível em: <http://www.unica.com.br/download.php?idSecao=17&id=19641791>. Acesso em: 24 de setembro de 2018.

VEIHMEYER, F.J.; HENDRICKSON, A.H. Soil-moisture conditions in relation to plant growth. **Plant Physiology**. v. 2, n.1, p.71-82, 1927.