

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
GOIANO – CÂMPUS RIO VERDE  
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS

**ALTERAÇÕES ESTRUTURAIS DO SOLO NO  
DESENVOLVIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR NO  
MUNICÍPIO DE RIO VERDE, GOIÁS**

Autor: Wainer Gomes Gonçalves  
Orientador: Prof. Dr. Eduardo da Costa Severiano

Rio Verde – GO  
setembro – 2012

**ALTERAÇÕES ESTRUTURAIS DO SOLO NO  
DESENVOLVIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR NO  
MUNICÍPIO DE RIO VERDE, GOIÁS**

Autor: Wainer Gomes Gonçalves  
Orientador: Prof. Dr. Eduardo da Costa Severiano

Dissertação apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de MESTRE EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Câmpus Rio Verde - Área de concentração Ciências Agrárias.

Rio Verde – GO  
setembro – 2012

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
GPT/BC/UFG**

G635a      Gonçalves, Wainer Gomes.  
Alterações estruturais do solo no desenvolvimento da cana-de-açúcar no município de Rio Verde, Goiás [manuscrito] / Wainer Gomes Gonçalves. – 2012.  
xvi, 53 f. : figs, tabs.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo da Costa Severiano;  
Coorientador: Prof. Dr. Alan Carlos Costa.

Dissertação (Mestrado) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Câmpus Rio Verde, Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, 2012.

Bibliografia.

Inclui lista de tabelas, figuras, e símbolos, siglas e abreviaturas.

1. Cana-de-açúcar – Qualidade. 2. Solo – Qualidade estrutural. 3. Intervalo Hídrico Ótimo. I. Título.

CDU: 633.61(817.3)

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
GOIANO – CÂMPUS RIO VERDE  
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS**

**ALTERAÇÕES ESTRUTURAIS DO SOLO NO  
DESENVOLVIMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR NO  
MUNICÍPIO DE RIO VERDE, GOIÁS**

Autor: Wainer Gomes Gonçalves  
Orientador: Dr. Eduardo da Costa Severiano

*TITULAÇÃO:* Mestre em Ciências Agrárias – Área de concentração  
Ciências Agrárias – Ciências Agrárias

APROVADA em 28 de setembro de 2012.

Prof. Dr. Raimundo Rodrigues Gomes Filho  
*Avaliador externo*  
UFG/GO

Prof. Dr. Marconi Batista Teixeira  
*Avaliador interno*  
IF Goiano/RV

Prof. Dr. Eduardo da Costa Severiano  
*Presidente da banca*  
IF Goiano/RV

A Deus,

Pela vida, saúde e força nos momentos de dificuldades.

OFEREÇO

À minha família,

Meus queridos pais, William Lemes Gonçalves e Lindoysa Mesquita Gomes Gonçalves, pelo carinho, paciência e empenho na minha formação de caráter. Aos melhores irmãos que eu poderia ter, Wenner e Weiner, pela amizade, companheirismo e braço amigo. À minha querida esposa, Solange Aparecida da Silva, pelo amor incondicional, compreensão e carinho. Aos meus sogros e segundos pais, Dona Nelci e Sr. Antoninho, pela confiança, amizade e boas risadas. Aos meus avós (*in memoriam*), Luisa, Diva, Gentil e Lindolfo, pelo carinho e confiança.

DEDICO

## AGRADECIMENTOS

Ao querido Jesus, pela proteção de sempre, sobretudo nos momentos de escuridão, que pareciam intermináveis.

Ao Instituto Federal Goiano, pelo esforço em capacitar seus servidores, pensando na qualidade do serviço prestado e na realização pessoal dos mesmos.

À Coordenação de Pessoal de Nível Superior, por criar oportunidades de abertura de novos cursos *Stricto sensu*, tornando realidade mais esta etapa de minha formação acadêmica.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás, pelo financiamento do experimento que gerou a minha dissertação.

Ao meu Orientador e amigo, o Professor Dr. Eduardo da Costa Severiano, pelos ensinamentos, amizade e confiança na minha capacidade de seguir em frente.

Ao meu Coorientador e amigo, o Professor Dr. Alan Carlos Costa, pelos ensinamentos e consideração que me dispensa desde os tempos de *Lato sensu*.

Ao meu amigo de longa data, o Professor Dr. Fabiano Guimarães Silva, pela amizade, incentivos e bom humor em todos os momentos.

Aos professores membros da Banca Avaliadora, Marconi Batista Teixeira e Raimundo Rodrigues Gomes Filho, por disporem de seu tempo para avaliar os resultados de anos de trabalho, vindo a somar com sua experiência e conhecimentos.

Aos professores do IF Goiano, Kátia Aparecida de Pinho Costa, Márcio Peixoto, Edson Souchie, Kátia Cylene, Renato Lara de Assis, José Milton, Anísio Rocha e Juliana de Fátima Sales, pela amizade e sugestões quanto ao trabalho.

Aos meus amigos de estrada no Mestrado, José Fausto Guimarães Silva e José Flávio Neto, pelo apoio e ajuda em todos os momentos, sempre em ritmo de festa...

Aos amigos de sempre e de experimento, Wellington e Gabriel, pela força na condução deste.

Aos demais companheiros de laboratório e pesquisa, Gean, Marina, Felipe Carreira, Renata, Denner, Luiz Carlos, Rângelis, Ricardo, Evandro, Gustavo, Guilherme, Brendow, Nelmício e Fabiano, pela força nos momentos de dificuldade e, sem dúvida, pela amizade que nasceu.

Ao pessoal da Universidade Federal de Lavras, em especial à Carla Eloize Carducci, pelas análises de ponto de murcha permanente do solo experimental.

Ao amigo Durcino, pela disposição em ajudar sempre que possível.

Aos colegas de trabalho, João Francisco, Paulo Dornelles, Vera Quintino, Carla Burgati, Dalto Gomes, Gilda Suely, Sebastião Marques, Durcinei e Michel, pela amizade e incentivos.

Aos colegas da CSA, pela amizade e ajuda no transporte da cana para a Usina.

À Usina São Francisco de Açúcar e Álcool, pela doação das mudas dos cultivares avaliados.

Aos amigos da Usina Santa Helena de Açúcar e Álcool, Maria Aparecida, Érica, Maria Amália, e demais pessoas, pela gentileza e pronta disponibilidade em realizar as análises do material vegetal.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram com o sucesso deste trabalho.

Agradeço aos meus familiares, William, Lindoysa, Wenner, Weiner, Cíntia, Dona Nelci, Sr. Antoninho, Vera, Guilherme, Célio, Talita e Maria Eduarda, por não me deixarem fraquejar em momento algum, confiando que eu venceria mais esta etapa da minha vida.

E, finalmente, à minha querida Solange, pelo amor. Simples assim.

## BIOGRAFIA DO AUTOR

WAINER GOMES GONÇALVES, filho de William Lemes Gonçalves e Lindoysa Mesquita Gomes Gonçalves, nasceu no dia 22 de novembro de 1985, na cidade de Rio Verde, Goiás.

No mês de fevereiro de 1999, iniciou no curso de Técnico em Agropecuária na Escola Agrotécnica Federal de Rio Verde-GO, atual Instituto Federal Goiano – Campus de Rio Verde, finalizando em dezembro de 2001.

Em março de 2002, ingressou no curso de Engenharia Agrônômica na atual Universidade de Rio Verde, Goiás, graduando-se em março de 2006.

Deste ano até 2008, exerceu a profissão de engenheiro agrônomo, atuando na área de assistência técnica, quando ingressou, por concurso, no atual Instituto Federal Goiano – Campus de Rio Verde.

Ainda em 2008, ingressou no curso de Pós-Graduação *Lato sensu* em Biodiesel, oferecido pelo IF Goiano, sob a orientação do Professor Dr. Alan Carlos Costa, concluindo em 2009.

Em agosto de 2010, iniciou no curso de mestrado no Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, no Instituto Federal Goiano – Campus de Rio Verde, sob a orientação do Professor Dr. Eduardo da Costa Severiano, concluindo em 28 de setembro de 2012.



## ÍNDICE

	Página
ÍNDICE DE TABELAS -----	vii
ÍNDICE DE FIGURAS -----	viii
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS -----	x
RESUMO -----	xiii
ABSTRACT -----	xv
INTRODUÇÃO GERAL-----	1
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA-----	3
Cultura da cana-de-açúcar-----	3
Compactação do solo em agrossistemas canavieiros-----	10
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS -----	16
OBJETIVOS GERAIS -----	24
MATERIAL E MÉTODOS -----	25
RESULTADOS E DISCUSSÃO -----	34
CONCLUSÕES -----	48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS -----	49

## ÍNDICE DE TABELAS

	Página
Tabela 1. Caracterização física e química do Latossolo Vermelho distroférico cultivado com cana-de-açúcar, no município de Rio Verde, Goiás.....	25
Tabela 2. Complexo sortivo do Latossolo Vermelho distroférico antes do cultivo da cana-de-açúcar, no município de Rio Verde, Goiás.....	26
Tabela 3. Atributos físicos do Latossolo Vermelho distroférico na entrelinha de cultivo da cana-de-açúcar, após o tráfego do trator Agrale 4230, no município de Rio Verde, Goiás.....	35
Tabela 4. Intervalo hídrico ótimo e análise da frequência de $\theta$ dentro dos limites do IHO ( $F_{dentro}$ ) durante o ciclo da cana-de-açúcar, para os diferentes níveis de tráfego na linha e na entrelinha de cultivo, em um Latossolo Vermelho distroférico, no município de Rio Verde, Goiás.....	42
Tabela 5. Análise de variância, médias gerais e coeficientes de variação para as variáveis produtivas e tecnológicas dos cultivares de cana-de-açúcar cultivados no Latossolo Vermelho distroférico no município de Rio Verde, Goiás.....	44
Tabela 6. Médias dos valores obtidos para as variáveis produtivas e tecnológicas da cana-de-açúcar, segundo corte, cultivada no Latossolo Vermelho distroférico no município de Rio Verde, Goiás.....	45

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Zoneamento agroecológico da cultura da cana-de-açúcar para o estado de Goiás. As áreas em tons de amarelo e verde representam as regiões aptas ao cultivo da cana-de-açúcar, com aptidão agrícola alta e média (Manzatto et al., 2009).....	9
Figura 2. Relação entre a umidade e os fatores físicos do solo que limitam o crescimento das plantas. A deterioração estrutural do solo ocorre de A, em que o $IHO=AD$ , para D, em que o $IHO$ é nulo. O conteúdo de água no solo ( $\theta$ ) aumenta da esquerda para a direita (adaptado de Silva et al., 2002).....	14
Figura 3. Etapas sequenciais de condução do experimento cultivado com cana-de-açúcar, sobre um Latossolo Vermelho distroférico, no município de Rio Verde, Goiás. A: área experimental. B: subsolagem da área. C: aplicação de calcário. D: incorporação do calcário. E: sulcação da área. F: plantio das mudas. G: sulcos de plantio contendo as mudas. H: visão geral do experimento. I: colheita manual da cana-de-açúcar. J: trator agrícola utilizado na aplicação dos níveis de tráfego. K: compactação do solo das parcelas experimentais. L: parcela experimental após a aplicação do tratamento de tráfego.....	27
Figura 4. Precipitação pluviométrica (mm) e temperatura média mensal ( $^{\circ}C$ ) durante o cultivo da cana-de-açúcar, no município de Rio Verde, Goiás.....	33
Figura 5. Macroporosidade em função da densidade do solo ( $D_s$ ), para o Latossolo Vermelho distroférico, cultivado com cana-de-açúcar, no município de Rio Verde, Goiás.....	36
Figura 6. Variação do conteúdo de água no solo ( $\theta$ ) com o incremento da Densidade do solo ( $D_s$ ), nos limites críticos de capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ , -0,006 MPa), ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ , -1,5 MPa), porosidade de aeração a 10% ( $\theta_{PA}$ ), e resistência do solo à penetração de 2,5 MPa ( $\theta_{RP}$ ), do Latossolo Vermelho distroférico cultivado com cana-de-açúcar, no município de Rio Verde, Goiás. A área hachurada representa o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO); $D_{sc}$ : densidade crítica ao desenvolvimento das plantas; $D_{sRP}$ : densidade em que o limite inferior do IHO passa a ser a RP.....	37

- Figura 7. Variação do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) e da Água Disponível (AD) em função da densidade do Latossolo Vermelho distroférico cultivado com cana-de-açúcar, no município de Rio Verde, Goiás. Dsb: densidade do solo benéfica;  $T_0 = 0$ ,  $T_2 = 2$ ,  $T_{10} = 10$  e  $T_{20} = 20$  passadas de trator no mesmo lugar..... 38
- Figura 8. Variação temporal do teor de água no solo em relação aos limites críticos do Intervalo Hídrico Ótimo, para as amostras da entrelinha de cultivo (L) da cana-de-açúcar. FV: Fase Vegetativa. FM: Fase de Maturação.  $T_0$ ,  $T_2$ ,  $T_{10}$  e  $T_{20}$  se referem ao número de passadas do trator Agrale 4230 sobre o solo..... 40
- Figura 9. Variação temporal do teor de água no solo em relação aos limites críticos do Intervalo Hídrico Ótimo, para as amostras da linha de cultivo (L) da cana-de-açúcar. FV: Fase Vegetativa. FM: Fase de Maturação.  $T_0$ ,  $T_2$ ,  $T_{10}$  e  $T_{20}$  se referem ao número de passadas do trator Agrale 4230 sobre o solo..... 41
- Figura 10. Possíveis causas da insensibilidade dos cultivares de cana-de-açúcar avaliados, em relação ao aumento da densidade do solo, nas condições experimentais. A: bioporosidade em agregados de solo. B: confinamento das raízes ou “efeito de vaso”..... 47

## LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACIONES E UNIDADES

$\theta$	----- conteúdo de água ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )
$\theta_{CC}$	----- conteúdo de água na capacidade de campo a -6 kPa ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )
$\theta_{PMP}$	----- conteúdo de água no ponto de murcha permanente a -1500 kPa ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )
$\theta_{RP}$	----- conteúdo de água na resistência do solo à penetração a 2,5 MPa ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )
$\theta_{PA}$	----- conteúdo de água na porosidade de aeração a 10% ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )
$^{\circ}\text{C}$	----- graus Celsius
$^{\circ}\text{N}$	----- graus de latitude Norte
$^{\circ}\text{S}$	----- graus de latitude Sul
%	----- por cento
>	----- maior que
$\geq$	----- maior ou igual a
<	----- menor que
$\leq$	----- menor ou igual a
**	----- significativo pelo teste F ( $p < 0,01$ )
$\mu\text{m}$	----- micrômetro
$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	----- micromol por metro quadrado por segundo
AD	----- água disponível no solo
AMG	----- areia muito grossa
AG	----- areia grossa
AM	----- areia média
AF	----- areia fina
AMF	----- areia muito fina
AR	----- açúcares redutores do caldo
ARC	----- açúcares redutores da cana
ATR	----- açúcares totais recuperáveis
Al	----- alumínio
Aw	----- verão chuvoso
B	----- brix
Ca	----- cálcio
$\text{C}_3$	----- planta com metabolismo fotossintético tipo $\text{C}_3$
$\text{C}_4$	----- planta com metabolismo fotossintético tipo $\text{C}_4$
cm	----- centímetro
$\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$	----- centimol de carga por decímetro cúbico
$\text{CO}_2$	----- dióxido de carbono

CRP	-----	curva de resistência à penetração
$\text{dm}^{-3}$	-----	decímetro cúbico
$\text{dm}^{-3} \cdot \text{dm}^{-3}$	-----	decímetro cúbico por decímetro cúbico
Dp	-----	densidade de partículas ( $\text{kg dm}^{-3}$ )
Ds	-----	densidade do solo ( $\text{kg dm}^{-3}$ )
Dsb	-----	densidade do solo benéfica ( $\text{kg dm}^{-3}$ )
Dsc	-----	densidade do solo crítica ( $\text{kg dm}^{-3}$ )
$D_{\text{SRP}}$	-----	densidade do solo em que o limite inferior do IHO é a $\theta_{\text{RP}}$
EL	-----	entrelinha de cultivo da cana-de-açúcar
F	-----	teor de fibra da cana
Fdentro	-----	frequência de ocorrência $\theta$ dentro da amplitude do IHO
FV	-----	fase vegetativa
FM	-----	fase de maturação
$\text{g ha}^{-1}$	-----	gramas por hectare
$\text{g kg}^{-1}$	-----	gramas por quilo
$\text{H}_2\text{O}$	-----	água
ha	-----	hectare
H + Al	-----	hidrogênio mais alumínio
IHO	-----	intervalo hídrico ótimo
IM	-----	índice de maturação da cana
kPa	-----	quilopascal
Ki	-----	relação molecular ( $\text{SiO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ )
Kr	-----	relação molecular $\text{SiO}_3: (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$
K	-----	potássio
kg	-----	quilograma
$\text{kg dm}^{-3}$	-----	quilograma por decímetro cúbico
$\text{kg ha}^{-1}$	-----	quilograma por hectare
$\text{kg t}^{-1}$	-----	quilograma por tonelada
L	-----	linha de cultivo da cana-de-açúcar
<i>m</i>	-----	saturação por alumínio
m	-----	metro linear
$\text{m}^2$	-----	metro quadrado
$\text{m}^3$	-----	metro cúbico
$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$	-----	metro cúbico por metro cúbico
mm	-----	milímetro
$\text{mg dm}^{-3}$	-----	miligrama por decímetro cúbico
Mg	-----	magnésio
Mg	-----	megagrama
$\text{Mg ha}^{-1}$	-----	megagrama por hectare
$\text{Mg m}^{-3}$	-----	megagrama por metro cúbico
Macro	-----	macroporosidade
Micro	-----	microporosidade
M.O.	-----	matéria orgânica
MPa	-----	megapascal
NS	-----	não significativo pelo teste F
pH	-----	potencial de hidrogênio da solução do solo
P(Mel)	-----	fósforo Melich ( $\text{mg dm}^{-3}$ )
PC	-----	pol da cana
PT	-----	porosidade total do solo
Q	-----	pureza do caldo

$r^2$	-----	coeficiente de determinação do ajuste
RP	-----	resistência do solo à penetração
S	-----	pol do caldo
T <sub>0</sub>	-----	tratamento sem tráfego
T <sub>2</sub>	-----	tratamento com 2 passadas de trator no mesmo lugar
T <sub>10</sub>	-----	tratamento com 10 passadas de trator no mesmo lugar
T <sub>20</sub>	-----	tratamento com 20 passadas de trator no mesmo lugar
V	-----	saturação por bases do solo

## RESUMO

GONÇALVES, Wainer Gomes. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Câmpus Rio Verde, setembro de 2012. Alterações estruturais do solo no desenvolvimento da cana-de-açúcar no município de Rio Verde, Goiás. Orientador: Dr. Eduardo da Costa Severiano. Coorientador: Dr. Alan Carlos Costa.

Na região centro-sul do Brasil, há uma tendência de redução do período de entressafra canavieira, condicionando tráfego de máquinas para colheita em condições de elevados conteúdos de água do solo. Nesta situação, a compactação é disseminada, uma vez que a água no solo atua como agente lubrificante de suas partículas, potencializando a sua deformação. O objetivo do presente estudo foi avaliar as alterações estruturais em um Latossolo Vermelho distroférico, através do monitoramento do conteúdo de água do solo em função dos limites críticos do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO), e quantificar seus efeitos sobre o rendimento agrícola e tecnológico da primeira soqueira de cultivares de cana-de-açúcar com diferentes ciclos de maturação. Para tanto, foram avaliados três cultivares de cana-de-açúcar (RB 83-5054; RB 84-5210 e RB 86-7515) submetidos a quatro níveis de compactação do solo, correspondentes ao número de passadas de um trator agrícola Agrale modelo 4230 e tara de 1,9 Mg ( $T_0$  = sem compactação;  $T_2 = 2$ ;  $T_{10} = 10$  e  $T_{20} = 20$  passadas do trator no mesmo lugar) em um esquema fatorial  $3 \times 4$ , com três repetições. Os efeitos deletérios causados na estrutura do solo pelo tráfego de maquinário agrícola ficaram limitados à entrelinha de cultivo das soqueiras, na camada de solo superficial (profundidade < 10 cm). O Intervalo Hídrico Ótimo foi reduzido a valores próximos de zero com 20 passadas do trator, nas entrelinhas de cultivo da cana-de-açúcar, reduzindo a frequência de ocorrência da umidade do solo dentro dos limites



do IHO. O monitoramento da umidade do solo indicou exposição da cultura a condições estressantes, embora a compactação do solo não tenha afetado as variáveis produtivas e tecnológicas dos cultivares de cana avaliados, mantendo-os satisfatórios para industrialização. Foi detectada diferença entre os cultivares estudados, com destaque para o cultivar RB 86-7515, quanto ao teor de sacarose aparente, à porcentagem de sólidos solúveis, à porcentagem de fibra e a quantidade de ATR produzida por tonelada de cana, independentemente dos níveis de compactação do solo a que estiveram sujeitos. Este resultado foi por causa da maior disponibilidade hídrica na fase vegetativa e ao estresse hídrico durante a maturação do cultivar tardio.

**Palavras-chave:** *Saccharum* sp., qualidade industrial da cana-de-açúcar, qualidade estrutural do solo, intervalo hídrico ótimo.

## ABSTRACT

GONÇALVES, Wainer Gomes. Federal Institute of Education, Science and Technology Goiano - *Campus* Rio Verde, 2012, September. Soil structural changes on sugarcane development, in Rio Verde, Goiás State. Adviser: Dr. Eduardo da Costa Severiano. Co adviser: Dr. Alan Carlos Costa.

In the Center-South of Brazil, there is a downward trend in the sugarcane off-season, where there is a predisposition of traffic harvesting machines in conditions of high soil water contents. In this situation, the compression is spread, since the water in the soil acts as a lubricating agent of its particles, potentiating their deformation. The aim of this study was to evaluate the structural changes in an Oxisol, physically degraded, by monitoring the soil water content in function of the Least Limiting Water Range (LLWR) critical limits, and quantify their effects on the yield and technological quality of sugarcane cultivars, of the first ratoon, with different maturity cycles. Therefore, there were evaluated three varieties of cane sugar (RB 83-5054, 84-5210 and RB 86-7515) underwent to four levels of soil compaction, corresponding to the number of passes of a tractor model 4230 Agrale with tare weight of 1.9 Mg ( $T_0$  = no compression,  $T_2$  = 2,  $T_{10}$  = 10 and  $T_{20}$  = 20 times that past the tractor in the same place) in a 3x4 factorial design with three replications. The deleterious effects on soil structure caused by traffic of agricultural machinery were limited to row spacing of the ratoon crop, in the layer of topsoil (depth <10 cm). The Least Limiting Water Range was reduced to values near zero with 20 passes of the tractor between the rows of growing sugar cane, reducing the frequency of occurrence of soil moisture within the limits of the IHO. The monitoring of soil moisture indicated exposure to stressful conditions of culture,

although soil compaction has not affected the production and technological variables of sugarcane cultivars evaluated, keeping them suitable for industrialization. Difference was detected between the cultivars studied, with emphasis on the cultivar RB 86-7515, regarding the apparent sucrose content, the percentage of soluble solids, the percentage of fiber and the amount of TRS per ton of cane produced, regardless of the levels of compaction to which they were subjected. This result was due to higher water availability during the vegetative stage and to water stress during ripening of late cycle cultivar.

**Key words:** *Saccharum* sp., sugarcane industrial quality, soil structural quality, Least Limiting Water Range

## INTRODUÇÃO GERAL

A aceitação internacional do etanol como combustível e a lucratividade alcançada pelo setor sucroalcooleiro traz euforia aos produtores de cana-de-açúcar no Brasil, com reflexos na intensificação e na expansão do seu cultivo a cada safra agrícola.

No estado de Goiás, essa expansão está relacionada com tecnologias voltadas ao cultivo de grandes áreas, que em grande parte é decorrente do uso de maquinário cada vez mais pesado. Em virtude do recobrimento predominante de solos com elevada aptidão agrícola. A elevada estabilidade da estrutura e friabilidade desses solos, aliado à topografia suavizada em que estão inseridos, favorece sobremaneira o manejo mecanizado dos tratos culturais (Severiano et al., 2009).

Em agrossistemas canavieiros, o uso de máquinas agrícolas ocorre em todas as etapas do processo produtivo (Paulino et al., 2004). Para tanto, faz-se a opção por veículos de maior capacidade unitária de carga, principalmente na colheita mecanizada (Pankhurst et al., 2003; Severiano et al., 2008), os quais muitas vezes trafegam sobre o solo em condições desfavoráveis de água no solo, tornando praticamente inevitável os problemas referentes à compactação do solo (Iaia et al., 2006), sendo esse considerado um dos principais fatores de sua degradação física (Mosaddeghi et al., 2007).

Na região centro-sul do Brasil, a safra canavieira se estende de abril a outubro, período que se caracteriza como sendo de baixa intensidade pluvial. Por outro lado, observa-se uma tendência de redução do período de entressafra (Severiano et al., 2009), favorecendo o tráfego de máquinas para colheita, em condições de elevados conteúdos de água do solo. Nessas condições, a compactação é disseminada, uma vez que a água no solo atua como agente lubrificante de suas partículas, potencializando a sua

deformação. Dessa forma, a sustentabilidade agrícola e ambiental é colocada em risco, por comprometer diretamente a qualidade estrutural do solo (Oliveira et al., 2003).

Nesse contexto, tornam-se necessários estudos relacionados à perda de qualidade física do solo e os atributos quantitativos e qualitativos da produção de cana-de-açúcar, bem como as respostas dos cultivares de diferentes ciclos de maturação quando submetidos a este estresse.

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### **Cultura da cana-de-açúcar**

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp. L.) é uma espécie originada das regiões de Nova Guiné e Indonésia, no Sudeste Asiático. Foi introduzida no Brasil a partir de 1522, em Pernambuco, expandindo para as demais regiões. Desde o princípio, a cana-de-açúcar desempenhou importante papel nas exportações brasileiras de açúcar, participando efetivamente na evolução histórica do país, tanto em termos infraestruturais quanto socioeconômicos (Mozambani et al., 2006). Tal importância ainda se mostra presente nos dias de hoje.

A cana-de-açúcar pertence à família Poaceae. O gênero *Saccharum* apresenta uma série de espécies comumente conhecidas por cana-de-açúcar, a saber: *S. officinarum*, *S. spontaneum*, *S. sinensis*, *S. barbieri* e *S. robustum*. Elas diferem entre si quanto ao teor de açúcar e a porcentagem de fibras (Mozambani et al., 2006).

A espécie *S. officinarum* foi por muito tempo a mais cultivada no mundo, pelo elevado teor de açúcar e baixa porcentagem de fibras, sendo classificada como “cana nobre”. Perdeu espaço, aos poucos, para os híbridos interespecíficos mais resistentes aos estresses bióticos e abióticos (Toppa et al., 2010).

Somado ao seu melhoramento genético, a cana-de-açúcar possui aparato fotossintético C<sub>4</sub>, altamente eficiente em converter energia radiante em energia química (açúcares), sobretudo em condições de elevada intensidade luminosa (Brunini, 2008). As suas características anatômicas e bioquímicas permitem reduzir a condutância estomática, evitando a perda de água sem alterar as taxas de assimilação de carbono (Diola & Santos, 2012), conferindo-lhes maior capacidade de acúmulo de biomassa

quando comparadas às plantas C<sub>3</sub>, em condições de temperatura elevada e déficit hídrico temporário (Taiz & Zeiger, 2009).

Cabe ainda ressaltar a capacidade de alguns cultivares desta planta em acumular solutos osmoticamente compatíveis em condições de déficit hídrico, que retardam os efeitos danosos deste estresse, a saber, prolina, trealose, glicina betaína e a própria sacarose (Wingler, 2002; Molinari et al., 2007; Guimarães et al., 2008; Carlin & Santos, 2009; Rhein et al., 2011). Todos estes fatores proporcionaram a expansão da cultura por diversas áreas, com contrastantes condições edafoclimáticas (Teramoto, 2003).

A cana-de-açúcar se desenvolve em forma de touceira; a parte aérea é formada por colmos, folhas, inflorescências e frutos; a parte subterrânea por raízes fasciculadas e rizomas; as raízes se concentram nos primeiros 50 centímetros de profundidade do solo. Os colmos e os rizomas são constituídos por nós, entrenós e gemas (Mozambani et al., 2006).

O ciclo da cana plantada pela primeira vez, isto é, oriunda de muda e que receberá o primeiro corte, recebe o nome de ciclo da cana-planta. Após o corte da cana-planta, inicia-se um novo ciclo de aproximadamente 12 meses, chamado de ciclo da soqueira ou cana-soca (Segato et al., 2006). Na medida em que a cana é colhida, há uma renovação do sistema radicular, quando as raízes oriundas dos perfilhos da soqueira substituem aquelas da cana-planta, tornando mais superficiais (Faroni & Trivelin, 2006).

A morte gradual das raízes após a colheita da cana-planta ou das soqueiras promove o incremento de matéria orgânica em profundidade no solo (Ball-Coelho et al., 1992). Esta substituição do sistema radicular independe do corte da parte aérea (colheita), mas é pelo déficit de água no solo (Vasconcelos, 2002). Quando o corte da cana ocorre em épocas de boa disponibilidade hídrica, praticamente inexistente morte de raízes (Vasconcelos & Dinardo-Miranda, 2011). No entanto, cabe ressaltar que o crescimento do sistema radicular da cana-de-açúcar é altamente dependente da variedade em estudo (Vasconcelos et al., 2003).

No centro-sul do Brasil, efetua-se o plantio em duas épocas distintas: (a) Primeira época, quando se planta de setembro a novembro, em que a cana apresenta ciclo de 12 meses de duração, denominada popularmente “cana-de-ano”; (b) Segunda época, quando o plantio é realizado de janeiro a início de abril, o ciclo da cana é

variável de 14 a 21 meses, recebendo a denominação de cana-de-ano e meio. (Segato et al., 2006).

De acordo com Diola & Santos (2012), os estádios de desenvolvimento da cana-de-açúcar se dividem em quatro fases, a saber:

- (a) Brotação e estabelecimento da cultura: tem a duração aproximada de um mês após o plantio. É uma fase caracterizada por intensa atividade respiratória, sendo influenciada pela temperatura, umidade e pela aeração do solo, entre outros fatores;

- (b) Perfilhamento: estende-se desde o final da brotação até 120 dias após o plantio. Neste estágio ocorre uma contínua ramificação subterrânea das juntas nodais do broto primário. A luz é o principal fator que influencia o perfilhamento, ativando as gemas vegetativas basais. Outros fatores como água, temperatura, espaçamento, aplicação de fertilizantes, etc. também influenciam o perfilhamento;

- (c) Desenvolvimento vegetativo e crescimento dos colmos: inicia-se logo após a fase de perfilhamento até 270 dias após o plantio. É a fase mais longa do ciclo da cultura e é quando ocorre o alongamento e espessamento do colmo, que cresce a taxas de 4 a 5 entrenós por mês em condições adequadas. Temperatura e umidade elevadas favorecem o alongamento dos colmos;

- (d) Maturação: fase de síntese e acúmulo de açúcar, que dura de 270-300 até 360 dias após o plantio. O crescimento vegetativo é reduzido e a maturação ocorre de baixo para cima, ou seja, os entrenós basais possuem mais açúcar que aqueles situados no ápice da planta, cujo conteúdo tende a igualar-se quando da completa maturação da cana. Alta intensidade luminosa, maior amplitude térmica diária e clima seco, com suprimento de água limitado, favorecem o amadurecimento dos colmos.

A maturação é a fase em que a cana-de-açúcar apresenta retorno econômico. Fisiologicamente, a maturação é a fase em que há o máximo acúmulo de açúcar nos colmos, fase em que as gemas nodais estão aptas a gerarem novas brotações quando plantadas, dando origem a novos indivíduos (Toppa et al., 2010). Desta maneira, a maturação pode ser estimada, correlacionando-se a pol da cana, que é um indicativo da quantidade de sacarose da cana-de-açúcar, a outras variáveis tecnológicas mais facilmente determináveis a campo, com destaque para o brix (teor de sólidos solúveis do caldo).

Os parâmetros tecnológicos mais utilizados para estimar a qualidade da matéria-prima produzida estão relacionados no Manual de Instruções do Conselho dos Produtores de Cana-de-Açúcar, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo (Consecana,



2006). Este manual estabelece e relaciona normas de amostragem e determinações laboratoriais da qualidade da cana-de-açúcar, entre outros parâmetros. Destacam-se:

- (a) Brix (B) ou teor de sólidos solúveis por cento, em peso, de caldo;
- (b) Pol do caldo (S) ou teor de sacarose aparente por cento, em peso, de caldo;
- (c) Pol da cana (PC) ou teor de sacarose aparente por cento, em peso, de cana;
- (d) Pureza aparente do caldo (Q) ou porcentagem de pol do caldo em relação ao brix;
- (e) Açúcares redutores do caldo (AR) ou teor de açúcares redutores (glicose e frutose, oriundos da hidrólise da sacarose) por cento, em peso, de caldo;
- (f) Açúcares redutores da cana (ARC) ou teor de açúcares redutores por cento, em peso, de cana;
- (g) Fibra da cana (F) ou teor de material insolúvel em água, por cento, em peso, de cana;
- (h) Açúcar total recuperável (ATR) ou teor de açúcares totais (glicose, frutose e sacarose), em quilos por tonelada de cana.

O ATR é hoje amplamente utilizado na comercialização da cana ao fornecedor, através do sistema de remuneração da tonelada de cana pela qualidade da matéria-prima fornecida (Sistema Consecana). O brix pode ser determinado utilizando refratômetros portáteis ou de bancada, enquanto os demais parâmetros são calculados a partir da leitura sacarimétrica obtida por meio de sacarímetros digitais. A extração do caldo é feita por meio da utilização de prensas hidráulica.

De acordo com Ripoli & Ripoli (2004), a avaliação dos indicadores de qualidade da cana, apontando um maior valor agregado à matéria-prima, deve ser feita da seguinte maneira: S e PC > 14%; Q > 85%; AR < 0,8%; F = 11 a 13%; ATR  $\geq$  122 kg t<sup>-1</sup>.

Para a determinação racional do ponto de colheita da cana, tem-se utilizado o parâmetro conhecido como Índice de Maturação (IM), calculado a partir da divisão do brix do ápice pelo brix da base do colmo. Para a cana-de-açúcar, os valores de IM admitidos são: (a) menor que 0,60 para cana verde; (b) entre 0,60 e 0,85 para cana em processo de maturação; (c) entre 0,85 e 1 para cana madura; e (d) maior que 1 para cana em processo de declínio de sacarose (Cesnik & Miocque, 2004; Rosseto, 2012). O brix pode ser facilmente determinado em campo, utilizando um refratômetro portátil.

A cana-de-açúcar é uma planta de dias curtos, sendo seu fotoperíodo crítico igual a 12,5 horas. Temperaturas noturnas oscilando de 20 a 26 °C também estimulam o florescimento. Trata-se da maturação botânica, quando há emissão de flores e sementes. Para a indústria, a cana não deve atingir este estágio, há paralisação do crescimento vegetativo do colmo, o tempo de armazenamento em campo é reduzido e há um decréscimo nas reservas de sacarose que são revertidas em energia prontamente utilizável pelos drenos, num processo conhecido como isoporização ou perda da qualidade industrial da cana-de-açúcar (Diola & Santos, 2012). O evite ao florescimento é conseguido por meio do melhoramento genético e da aplicação de reguladores vegetais.

A utilização de produtos químicos maturadores é uma prática comum utilizada nos canaviais. O seu uso visa a antecipar a obtenção de matéria-prima de qualidade adequada, facilitando o manejo varietal e o escape às lacunas de produção e perdas de matéria-prima, pela variação climática (Gheller, 2001). Tradicionalmente são utilizados produtos pertencentes à classe dos reguladores de crescimento (sulfometuron metil, entre outros) e à classe dos herbicidas, principalmente o glifosato (Toppa et al., 2010).

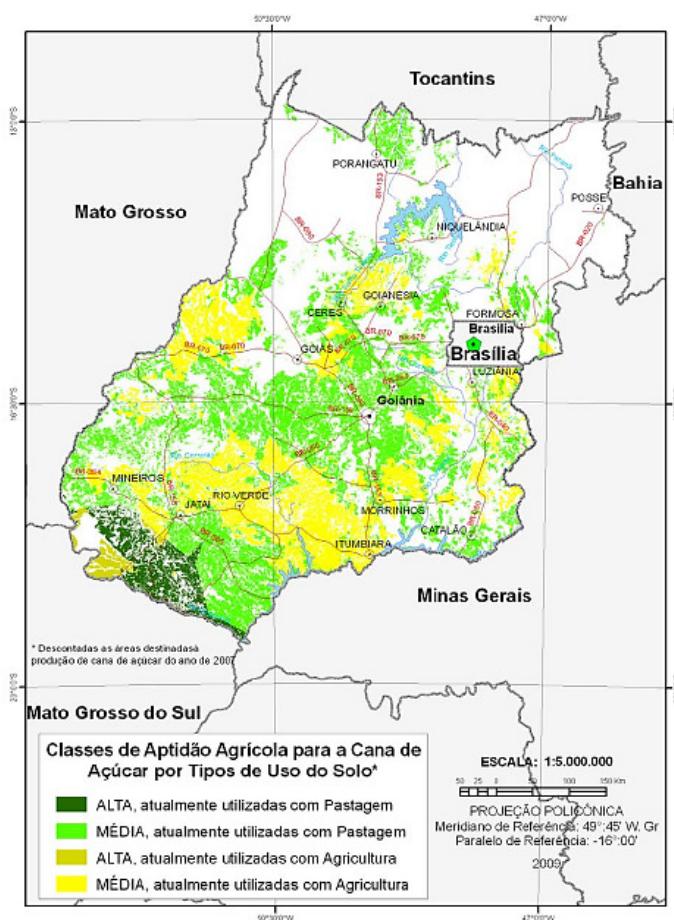
A cana-de-açúcar é uma planta essencialmente tropical e alógama, que pode ser cultivada entre as latitudes 35° N e 30° S a até 1000 metros de altitude. Em razão desse caráter cosmopolita e ao seu ciclo, classificado como semiperene, a cana-de-açúcar está sujeita às variações climáticas durante o ano inteiro, interferindo na sua produtividade, maturação e qualidade do produto colhido (Segato et al., 2006). Para manter índices de produção satisfatórios, esta cultura necessita de uma estação longa, quente (temperatura variando de 30 a 35 °C) e úmida (precipitação entre 1100 a 1500 mm bem distribuídos), com alta incidência de radiação solar (200 a 1200  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), responsável pela fase vegetativa, e uma estação curta, ensolarada e relativamente seca para o seu amadurecimento e colheita (Diola & Santos, 2012). Para a maturação da cana, a disponibilidade de água no solo deve ser baixa para reduzir o crescimento vegetativo, sendo, entretanto, suficiente para garantir a síntese, o transporte e o armazenamento de açúcar. A queda do potencial hídrico da planta estimula a conversão dos açúcares redutores em sacarose (Toppa et al., 2010).

Com a intensificação do efeito estufa e os elevados preços do barril de petróleo, a cana-de-açúcar se tornou uma das mais importantes culturas agrícolas do mundo, visto que representa uma das melhores opções de fonte de energia renovável (Maule et al., 2001; Waclawovsky et al., 2010).

De acordo com Goldemberg (2010), o rendimento econômico da cana-de-açúcar pode ser dividido em três grandes grupos, que contém cada um, cerca de 30% da energia de biomassa da cultura, a saber: (a) caldo: que representa hoje o terço mais valioso, que pode dar origem ao açúcar ou ao etanol, que tem fins de combustível ou para indústria alcoolquímica; (b) Bagaço: utilizado na geração de energia elétrica (cogeração) ou ainda na produção de etanol de segunda geração, a partir da hidrólise da celulose em açúcares fermentescíveis e (c) Palhiço: hoje deixado na superfície do solo, para proteção do mesmo, mas que também pode ser utilizado na cogeração de energia e na produção de etanol de celulose. A palhada tem ainda a função de dar suporte à introdução do plantio direto nos agrossistemas canavieiros (Duarte-Junior & Coelho, 2008).

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e seus derivados, açúcar e álcool, cuja biomassa contribui com 15,7% da composição da matriz energética brasileira (EPE, 2012). Na safra 2011/12, foram moídas 493,2 milhões de toneladas de cana-de-açúcar na região centro-sul, sendo produzidos 31,3 milhões de toneladas de açúcar e 20,5 bilhões de litros de etanol, que consumiram 48,4 e 51,6% da produção total de colmos, respectivamente (Unica, 2012).

Segundo Manzatto et al., (2009), Goiás se encontra entre os estados brasileiros com grande potencial para expansão da agricultura canavieira, sobretudo pelas suas condições edafoclimáticas, entre outros fatores (Figura 1). Esta expansão pelo cerrado goiano já é uma realidade, porque o estado figura como terceiro maior produtor de cana da região centro-sul, com 45,2 milhões de toneladas de cana moídas na safra 2011/12, sendo superado apenas por São Paulo e Minas Gerais (Unica, 2012).



**Figura 1.** Zoneamento agroecológico da cultura da cana-de-açúcar para o estado de Goiás. As áreas em tons de amarelo e verde representam as regiões aptas ao cultivo da cana-de-açúcar, com aptidão agrícola alta e média (Manzatto et al., 2009).

Há um impasse quanto aos efeitos dessa expansão (Szmrecsányi et al., 2008). As menores emissões de gases de efeito estufa oriundos da queima do etanol em relação aos combustíveis fósseis, os elevados preços do petróleo, a progressiva colheita mecanizada de cana crua, a bem sucedida introdução dos veículos bicombustíveis no mercado brasileiro, bem como a tradicional mistura do etanol com a gasolina justificaram e impulsionaram ostensivamente este crescimento.

No entanto, os efeitos colaterais da monocultura canavieira, disseminada em larga escala e sem obedecer a qualquer zoneamento ecológico e de aptidão de terras (Resende et al., 2007; Manzatto et al., 2009) podem ser notadamente apontados. Citam-se o desarranjo das atividades produtivas locais, pela substituição das atividades econômicas tradicionais, a concentração fundiária, o desemprego rural advindo do corte mecanizado e a sazonalidade de contratação de mão de obra, que culmina com o êxodo rural.

No entanto, é importante salientar que os impactos ambientais relacionados à atividade sucroalcooleira, como a compactação do solo, a erosão, a inadequada recarga da água subterrânea, a redução da biodiversidade, as queimadas ainda utilizadas em áreas de colheita manual e a degradação da paisagem entre outros, tornam-se preocupantes mais em função da forma de expansão e da distribuição espacial do setor, do que por serem próprios ou intrínsecos da cultura da cana-de-açúcar (Szmrecsányi et al., 2008).

### **Compactação do solo em agrossistemas canavieiros**

Os Latossolos representam a classe de solos mais cultivada na região dos cerrados, tanto pelo seu predomínio no recobrimento da paisagem (Ker, 1997), quanto pela sua topografia suavizada, com estrutura altamente friável (Macedo, 1996). Tais características favorecem sobremaneira a mecanização das atividades agrícolas, com destaque para a colheita mecanizada, cuja demanda cresceu nos últimos anos (Souza et al., 2005).

Por outro lado, os Latossolos da região do cerrado apresentam uma mineralogia predominantemente oxídica e estrutura tipo granular, conferindo a estes solos elevada porosidade e baixa capacidade de suporte de cargas, em razão do menor contato entre grânulos (Ajayi et al., 2009), tornando-os altamente suscetíveis à compactação do solo (Leão et al., 2006). Além disso, estes solos em condições naturais, apresentam baixa capacidade de armazenamento de água (Ajayi et al., 2009) e, quando da ocorrência de veranicos ou da distribuição irregular de chuvas, expõem as culturas que são cultivadas ao risco de déficit hídrico.

A compactação do solo representa a diminuição de volume do solo não saturado, advinda da aplicação de uma determinada pressão externa, que pode ser consequência do tráfego de máquinas agrícolas, equipamentos de transporte e de animais (Lima, 2004). A compactação é intensificada com o aumento do teor de água do solo (Severiano, 2010) até determinado limite, pela ação lubrificante da molécula de água entre as partículas do solo.

A compactação aumenta a densidade do solo e a sua resistência mecânica (Arvidsson, 2001), diminuindo a porosidade total, o tamanho e a continuidade dos poros (Servadio et al., 2001), a água disponível às plantas (Beutler et al., 2007), principalmente quando as culturas são submetidas ao estresse hídrico (Severiano et al.,

2008). A absorção de nutrientes, a infiltração e a redistribuição de água e as trocas gasosas também são afetadas pela compactação do solo, além da restrição à penetração de raízes (Gysi, 2001), resultando em aumento da erosão e da energia necessária para o preparo do solo (Canillas e Salokhe, 2002). Observa-se também uma série de alterações nas plantas, com redução do estande, variação no tamanho das plantas, amarelecimento das folhas, má formação do sistema radicular e aumento de células do córtex em raízes de cana-de-açúcar (Queiroz-Voltan et al., 1998).

Por essa razão, raízes desenvolvidas em solos compactados se tornam grossas, achatadas e apresentam uma orientação de crescimento bastante irregular. Com o engrossamento, ocorre redução do volume de solo explorado, levando a menor absorção de água e nutrientes (Ferreira e Dias Júnior, 1996). Na parte aérea, ocorre redução da atividade fotossintética e expansão foliar. Ocorre também aumento da respiração radicular, levando ao maior consumo de fotoassimilados pelas raízes e resultando em menor acúmulo de matéria seca da parte aérea (Tubeileh et al., 2003) e, conseqüentemente, redução de produtividade da cultura.

Silva & Ribeiro (1997), avaliando o impacto do cultivo contínuo de cana-de-açúcar sobre as propriedades físicas de um Latossolo Amarelo dos Tabuleiros Costeiros alagoanos, observaram que após dois anos consecutivos de cultivo, houve grande incremento na densidade do solo ( $D_s=1,55 \text{ Mg m}^{-3}$ ) nos horizontes superficiais (até 0,35 metro de profundidade) em comparação com o mesmo solo sob mata nativa ( $D_s=1,29 \text{ Mg m}^{-3}$ ). A porosidade total do solo (PT) também foi afetada, caindo de  $0,52 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (mata nativa) para  $0,42 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (solo cultivado por dois anos) na mesma camada de solo. Entretanto, a partir daí, detectou-se gradativa recuperação da qualidade estrutural do solo, quando aos 25 anos de cultivo, os autores encontraram valores de porosidade total semelhantes ao solo sob mata ( $PT=0,51 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ). Os autores explicaram que o ciclo semiperene da cana-de-açúcar, renovada a cada seis anos, e o hábito de crescimento fasciculado do sistema radicular da cultura, proporcionaram recuperação da condição estrutural do solo, atingindo patamares semelhantes àqueles sob mata. A densidade do solo e a macroporosidade também apresentaram comportamento semelhante.

Souza et al. (2006a), observaram que os valores de resistência à penetração encontrados em um Latossolo Vermelho Distrófico de textura argilosa cultivados por 40 anos com cana-de-açúcar evidenciaram elevada compactação do solo, mesmo quando avaliados 24 e 72 horas após uma chuva de 38 mm.

Silva Junior et al., 2010, avaliando o impacto de diferentes sistemas de preparo para o plantio da cana-de-açúcar sobre os atributos físicos do solo, concluíram que o cultivo mínimo (controle de invasoras sem revolvimento do solo + abertura dos sulcos de plantio) apresentou na camada estudada (0 a 40 centímetros) maiores valores de densidade do solo e menores de porosidade total.

Souza et al. (2006b) afirmam que o corte mecanizado de cana crua sobre Latossolo Vermelho Eutroférico argiloso promove alterações nos atributos físicos do solo até a profundidade de 40 centímetros, quando comparados àqueles sob mata nativa. Neste sistema de corte, foram encontrados valores maiores de densidade do solo, microporosidade e matéria orgânica até a profundidade de 10 centímetros, em comparação ao sistema de corte manual com queima da palhada de cana.

Assim, a intensificação do trânsito de máquinas, notadamente durante a colheita da cana-de-açúcar, verificada inclusive em períodos inadequados de trafegabilidade, desencadeia o agravamento do processo de compactação dos solos em agrossistemas canavieiros (Pankhurst et al., 2003).

Uma das alternativas de escape à compactação ostensiva em canaviais é o controle de tráfego agrícola, que busca separar as zonas de passagem de rodados daquelas de crescimento das plantas, concentrando as áreas impactadas pela mecanização agrícola em faixas delimitadas (Roque et al., 2010). Foi comprovado que esta prática culmina com aumento de disponibilidade de água às plantas de cana-de-açúcar, pelo evite à compactação e à manutenção da qualidade estrutural do solo (Roque et al., 2011), favorecendo o desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar (Souza et al., 2012).

O manejo inadequado do solo causa uma série de alterações nos seus atributos físicos, os quais interagem entre si. Desta maneira, a utilização de indicadores de qualidade física do solo que integrem mais de um atributo do solo se faz necessária, por melhor representar o efeito da compactação do solo sobre o desenvolvimento de plantas (Silva et al., 2006). Dentre estes indicadores, cita-se a densidade relativa do solo (Correchel et al., 1999), a pressão de pré-consolidação (Dias Junior & Pierce, 1995; Souza et al., 2012), o índice S (Andrade & Stone, 2009) e o intervalo hídrico ótimo (Severiano et al., 2011).

O Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) é um indicador da qualidade estrutural do solo introduzido no Brasil por Tormena et al., (1998), a partir do modelo proposto por Silva et al. (1994).

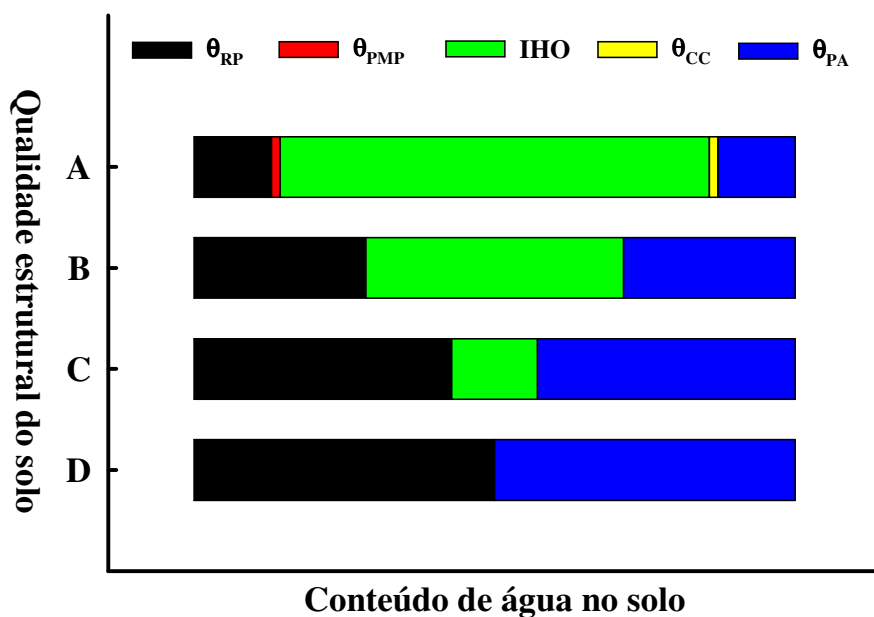
Este indicador representa uma faixa de umidade do solo em que as restrições físicas ao crescimento das plantas são mínimas, relacionando em um único parâmetro, as limitações impostas pela água, pelo ar e pela resistência mecânica do solo à penetração de raízes (Silva et al., 1994; Imhoff, 2002). Caracteriza, assim, um avanço em relação ao conceito clássico de água disponível ( $AD = \theta_{CC} - \theta_{PMP}$ ), por melhor se correlacionar ao crescimento vegetal (Tormena et al., 2007). Mesmo havendo água disponível, a resistência do solo à penetração de raízes e a aeração deficiente, verificadas em solos compactados, permanecem limitando o desenvolvimento vegetal (Klein & Libardi, 2000).

A determinação do IHO envolve a definição de limites superiores e inferiores de água disponível. Como limites superiores têm-se a umidade na capacidade de campo do solo ( $\theta_{CC}$ ), ou seja, a água retida na tensão de 0,006 MPa (Mello et al., 2002; Severiano et al., 2008) ou a umidade em que a porosidade de aeração ( $\theta_{PA}$ ) é de 10% (Grable & Siemer, 1968).

Os limites inferiores são a umidade no ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ), isto é, o conteúdo de água retido na tensão de 1,5 MPa (Richards & Weaver, 1943) ou a umidade em que a resistência à penetração ( $\theta_{RP}$ ) é de 2,5 MPa (Camargo & Alleoni, 1997). Entretanto, pode ocorrer variação nos valores dos limites críticos, sem que haja alteração de aplicabilidade do conceito (Silva et al., 2002).

Quando a qualidade física do solo é adequada, o IHO iguala-se à AD ( $\theta_{CC} - \theta_{PMP}$ ). Entretanto, devido às alterações estruturais advindas do incorreto manejo do solo, há a substituição destes limites pela  $\theta_{PA} - \theta_{RP}$ , reduzindo o IHO, até que se torne nulo (Leão et al., 2004) (Figura 2).





**Figura 2.** Relação entre a umidade e os fatores físicos do solo que limitam o crescimento das plantas. A deterioração estrutural do solo ocorre de A, onde o IHO=AD, para D, em que o IHO é nulo. O conteúdo de água no solo ( $\theta$ ) aumenta da esquerda para a direita (adaptado de Silva et al., 2002).

A umidade do solo em que sua matriz atinge valores limitantes ao crescimento radicular é o fator que mais influencia negativamente o IHO (Imhoff et al., 2001). A porosidade de aeração, que reduz sensivelmente com o incremento da densidade do solo, pode limitar o crescimento vegetal por deficiência de oxigênio e excesso de  $\text{CO}_2$ , em condições de solo compactado e úmido, pela reduzida porosidade e descontinuidade de poros (Lapen et al., 2004).

A compactação do solo reduz o IHO, na maioria dos casos (Silva e Kay, 1997; Tormena et al., 1999; Imhoff et al., 2001, Cavalieri et al., 2006), por causa do aumento da densidade do solo ( $D_s$ ). O valor de  $D_s$  em que o IHO é nulo em que qualquer conteúdo de água no solo se denomina densidade do solo crítica ( $D_{sc}$ ), causando algum tipo de limitação física ao crescimento de plantas.

O IHO varia com a textura (Reichert et al., 2007) e com a estrutura do solo (Severiano et al., 2008). A  $D_{sc}$  diminui com o incremento de argila do solo (Severiano, 2010).

O conceito de densidade do solo benéfica ( $D_{sb}$ ) foi proposto por Severiano et al. (2011) para Latossolos altamente intemperizados, com baixa capacidade de retenção de água. Nestes solos, uma leve compactação pode ser benéfica, por converter parte da sua expressiva macroporosidade natural (poros  $> 50 \mu\text{m}$  de diâmetro), responsável pela aeração e drenagem, em microporos (porosidade  $\leq 50 \mu\text{m}$  de diâmetro), que tem o papel

de retenção de água (Severiano, 2010). Isto resulta em ganhos de produtividade das culturas (Freddi et al., 2009).

Explorando o conceito do IHO, Severiano et al. (2011) introduziram uma forma de quantificar a  $D_{sb}$ , avaliando Latossolos oxídicos ( $k_r \leq 0,75$ ) da região dos cerrados. Estes autores observaram que a densidade do solo benéfica é aquela em que o IHO é máximo em termos de retenção de água no solo. Tal conceito é importante no monitoramento da qualidade física do solo.

O monitoramento da variação temporal do conteúdo de água no solo ( $\theta$ ) tem sido utilizada como ferramenta de quantificação da frequência de ocorrência de  $\theta$  dentro dos limites do IHO ( $F_{dentro}$ ), de maneira a inferir por quantos e quais períodos de desenvolvimento fenológico, as plantas estiveram submetidas ou não as condições estressantes em termos de água disponível, aeração e resistência à penetração de raízes (Klein & Camara, 2007; Blainski et al., 2009; Blainski et al., 2012).

A aplicabilidade do conceito do IHO na agricultura canavieira já é uma realidade (Severiano et al., 2008; Severiano et al., 2009; Cavalieri et al., 2011; Roque et al., 2011). Pacheco & Cantalice (2011), avaliando o efeito do cultivo de cana-de-açúcar sobre o Intervalo Hídrico Ótimo de um Argissolo Amarelo distrocoeso, perceberam que as operações mecanizadas reduziram a amplitude do IHO nos horizontes subsuperficiais do solo em questão.

Severiano et al. (2010) observaram que a colheita mecanizada da primeira safra é responsável pelos impactos negativos sobre a estrutura dos solos sob cana-de-açúcar, visto que as operações de preparo do solo quando da renovação do canavial elimina o histórico de tensão do mesmo. Dessa forma, monitorar os efeitos da compactação do solo é de fundamental importância na manutenção da longevidade dos canaviais (Braunbeck & Oliveira, 2006).

Os recentes estudos de modelagem da compactação em agrossistemas canavieiros têm contribuído para a minimização dos impactos na estrutura dos solos cultivados com cana-de-açúcar (Severiano et al., 2009; Silva et al., 2009). No entanto, os efeitos dessa degradação estrutural sobre a produtividade e a qualidade industrial dos ciclos posteriores da cultura, bem como a sua influência no desenvolvimento de cultivares de cana-de-açúcar distintos quanto ao ciclo de maturação, seja ele precoce, médio ou tardio ainda carecem de resultados científicos. Nesse sentido, estudos que visam identificar estes impactos, em cortes sucessivos da cultura, tornam-se promissores na busca da sustentabilidade da atividade agrícola e ambiental.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AJAYI, A. E.; DIAS JUNIOR, M. S.; CURI, N.; ARAUJO JUNIOR, C. F.; SOUZA, T. T.; INDA JUNIOR, A. V. Strength attributes and compaction susceptibility of Brazilian Latosols. *Soil and Tillage Research*, 105: 122-127, 2009.

ANDRADE, R.S.; STONE, L.F. Índice S como indicador da qualidade física de solos do cerrado brasileiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 13: 382–388, 2009.

ARVIDSSON, J. Subsoil compaction caused by heavy sugarbeet harvesters in southern Sweden I. Soil physical properties and crop yield in six field experiments. *Soil & Tillage Research*, 60: 67-78. 2001.

BALL-COELHO, B.; SAMPAIO, E.V.S.B.; TIESSEN, H.; STEWART, J.W.B. Root dynamics in plant and ratoon crops of sugar cane. *Plant and Soil*, 142: 297-305, 1992.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; CENTURION, M.A.P.C; LEONEL, C.L.; JOÃO, A.C.G.S.; FREDDI, O.S. Intervalo hídrico ótimo no monitoramento da compactação e da qualidade física de um Latossolo Vermelho cultivado com soja. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31: 1223-1232, 2007.

BLAINSKI, E.; GONÇALVES, A.C.A.; TORMENA, C.A.; FOLEGATTI, M.V.; GUIMARÃES, R.M.L. Intervalo hídrico ótimo num Nitossolo Vermelho distroférrico irrigado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.33, p.273-281, 2009.

BLAINSKI, E.; TORMENA, C.A.; GUIMARÃES, R.M.L.; NANNI, M.R. Qualidade física de um Latossolo sob plantio direto influenciada pela cobertura do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36:79-87, 2012.

BRAUNBECK, O.A.; OLIVEIRA, J.T.A. Colheita de cana-de-açúcar com auxílio mecânico. *Engenharia Agrícola*, 26: 300-308, 2006.

BRUNINI, O. Ambientes climáticos e exploração agrícola da cana-de-açúcar. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A.C M. de; ANDRADE LANDELL, M. G. DE. *Cana-de-açúcar*. Campinas: Instituto Agrônômico, 2008. p. 205-218.

CAMARGO, O.A.; ALLEONI, L.R.F. *Compactação do solo e o desenvolvimento de plantas*. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 1997. 132 p.

CANILLAS, E.C.; SALOKHE, V.M.A decision support system for compaction assessment in agricultural soils. *Soil & Tillage Research*, 65: 221-230, 2002.

CARLIN, S.D.; SANTOS, D.M.M. Indicadores fisiológicos da interação entre déficit hídrico e acidez do solo em cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 44: 1106-1113, 2009.

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*, 30: 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*. 35: 1541-1549, 2011.

CESNIK, R.; MIOCQUE, J. *Melhoramento da cana-de-açúcar*. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. 307 p.

CONSECANA - Conselho dos Produtores de Cana-de-açúcar, Açúcar, Álcool do Estado de São Paulo. *Manual de instruções*. 5.ed. Piracicaba: CONSECANA, 2006. 112p.

CORRECHEL, V.; SILVA, A.P.; TORMENA, C.A. Influência da posição relativa à linha de cultivo sobre a densidade do solo em dois sistemas de manejo do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 23: 165-173, 1999.

DIAS JUNIOR, M.S. & PIERCE, F.J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. *Soil Technology*, 8: 139-151, 1995.

DIOLA, V.; SANTOS, F. Fisiologia. In: SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDAS, C. (Eds.). *Cana-de-açúcar: bioenergia, açúcar e etanol – tecnologias e perspectivas*. 2 ed. Viçosa: Os Editores, 2012. p. 25-49.

DUARTE JUNIOR, J.B.; COELHO, F.C. 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: 576–583, 2008.

FARONI, C.E.; TRIVELIN, P.C.O. Quantificação de raízes metabolicamente ativas de cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 41: 1007-1013, 2006.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. *Balanco energético nacional: Ano base 2011*, EPE: Brasília, 2012. 282p.

FERREIRA, M.M.; DIAS JÚNIOR, M.S. *Física do solo*. Lavras: UFLA, 1996. 86p.

FREDDI, O.S.; CENTURION, J.F.; DUARTE, A.P. & PERES, F.S.C. Compactação do solo e produção de cultivares de milho em Latossolo Vermelho: II – Intervalo hídrico ótimo e sistema radicular. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33: 805-818, 2009.

GHELLER, A. C. A. Resultados da aplicação de maturadores vegetais em cana-de-açúcar, variedades RB72454 e RB835486 na região de Araras, SP. In: 4 Jornada Científica da UFSCar, 2001, São Carlos. *Resumos...*, 2001.

GOLDEMBERG, J. A estratégia de São Paulo para o etanol. In: CORTEZ, L.A.B. (Ed.). *Bioetanol de cana-de-açúcar: P&D para produtividade e sustentabilidade*. São Paulo: Blucher, 2010. p. 19-25.

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 America Journal*, 32: 180-186, 1968.

GUIMARÃES, E.R.; MUTTON, M.A.; MUTTON, M.J.R.; FERRO, M.I.T.; RAVANELI, G.C.; SILVA, J.A. Free proline accumulation in sugarcane under water restriction and spittlebug infestation. *Scientia Agricola*, 65: 628-633, 2008.

GYSI, M. Compaction of a Eutric Cambisol under heavy wheel traffic Switzerland: Field data and a critical state soil mechanics model approach. *Soil & Tillage Research*, 61: 133-142, 2001.

IAIA, A.M.; MAIA, J.C.S.; KIM, M.E. Uso do penetrômetro eletrônico na avaliação da resistência do solo cultivado com cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 10: 523-530, 2006.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; DIAS JÚNIOR, M.S. & TORMENA, C.A. Quantificação das pressões crítica para o crescimento das plantas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 25: 11-18, 2001.

IMHOFF, S. D. C. *Indicadores de qualidade estrutural e trafegabilidade de Latossolos e Argissolos Vermelhos*. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP. 94 p. 2002.

KER, J.C. Latossolos do Brasil: uma revisão. *Geonomos*, 5: 17-40, 1997.

KLEIN, V.A.; LIBARDI, P.L. Faixa de umidade menos limitante ao crescimento vegetal e a sua relação com a densidade do solo ao longo do perfil de um Latossolo Roxo. *Ciência Rural*, 30: 959-964, 2000.

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*, 31: 221-227, 2007.

LAPEN, D.R.; TOPP, G.C.; GREGORICH, E.G.; CURNOE, W.E. Least limiting water range indicator of soil quality and corn production, eastern Ontario, Canada. *Soil & Tillage Research*, 78: 151-170, 2004.

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*, 28: 415-423, 2004.

LEÃO, T. P.; SILVA, A. P.; MACEDO, M. C. M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V. P. B. Least limiting water range: a potential indicator of changes in near-surface soil physical quality after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, 88: 279-285, 2006.

LIMA, C. L. R. *Compressibilidade de solos versus intensidade de tráfego em um pomar de laranja e pisoteio animal em pastagem irrigada*. Tese (Doutorado em Agronomia) – Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP. 70 p. 2004.

MACEDO, J. Os solos da região dos cerrados. In: ALVARES, V. H.; FONTES, L. E. F.; FONTES, M. P. F. (Ed.). *O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado*. Viçosa, MG: SBCS/UFV, 1996 p. 135-155.

MANZATTO, C. V.; ASSAD, E. D.; BACCA, J. F. M.; ZARONI, M. J.; PEREIRA, S. E. M. *Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009. 55 p. (Documentos / Embrapa Solos, 110).

MAULE, R. F.; MAZZA, J. A.; MARTHA JR, G. B. Produtividade agrícola de cultivares de cana-de-açúcar em diferentes solos e épocas de colheita. *Scientia Agricola* 58: 295-301. 2001.

MELLO, C.R.; OLIVEIRA, G.C.; RESCK, D.V.S.; LIMA, J.M.; DIAS JUNIOR, M.S. Estimativa da capacidade de campo baseada no ponto de inflexão da curva característica. *Ciência e Agrotecnologia*, 26: 836-841, 2002.

MOLINARI, H.B.C; MARUR, C.J.; DAROS, E.; CAMPOS, M.K.F.; CARVALHO, J.F.R.P.; BESPALHOK FILHO, J.C.; PEREIRA, L.F.P.; VIEIRA, L.G.E. Evaluation of the stress-inducible production of proline in transgenic sugarcane (*Saccharum* spp.): osmotic adjustment, chlorophyll fluorescence and oxidative stress. *Physiologia Plantarum*, 130: 218-229, 2007.

MOSADDEGHI, M.R.; KOOLEN, A.J.; HEMMAT, A.; HAJABBASI, M.A.; LERINK, P. Comparisons of different procedures of pre-compaction stress determination on weakly structure soils. *Journal of Terramechanics*, 44: 53-63, 2007.

MOZAMBANI, A. E.; PINTO, A. S.; SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C. F. M. História e morfologia da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J. C. M. (Org.). *Atualização em produção de cana-de-açúcar*. Piracicaba: CP. p. 11-18. 2006.

OLIVEIRA, G.C.; DIAS JÚNIOR, M.S.; RESCK, D.V.S.; CURI, N. Alterações estruturais e comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho distrófico argiloso sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 38: 291-299, 2003.

PACHECO, E.P.; CANTALICE, J.R.B. Compressibilidade, resistência a penetração e intervalo hídrico ótimo de um Argissolo Amarelo cultivado com cana-de-açúcar nos tabuleiros costeiros de Alagoas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35: 403-415, 2011.

PANKHURST, C.E.; MAGAREY, R.C.; STIRLING, G.R. BLAIR, B.L.; BELL, M.J.; GARSIDE, A.L. Management practices to improve soil health and reduce the effects of detrimental soil biota associated with yield decline of sugarcane in Queensland, Australia. *Soil & Tillage Research*, 72: 125-137, 2003.

PAULINO, A.F.; MEDINA, C.C.; AZEVEDO, M.C.B.; SILVEIRA, K.R.P.; TREVISAN, A.A.; MURATA, I.M. Escarificação de um Latossolo Vermelho na pós-colheita de soqueira de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 28: 911-917, 2004.

QUEIROZ-VOLTAN, R.B.; PRADO, H.; MORETTI, F.C. Aspectos estruturais de raízes de cana-de-açúcar sob o efeito da compactação do solo. *Bragantia*, 57: 49-55, 1998.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S. da; REICHERT, J. M. (Ed.). *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.5, p.49-134, 2007.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S.B.; CORRÊA, G.F. *Pedologia: Base para distinção de ambientes*. 5.ed. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 2007. 322p.

RHEIN, A.F.L.; SANTOS, D.M.M.; CARLIN, S.D. Atividade da enzima redutase do nitrato e teores de prolina livre em raízes de cana-de-açúcar sob os estresses hídrico e ácido no solo. *Semina*, 32: 1345-1360, 2011.

RICHARDS, L.A.; WEAVER, L.R. Fifteen-atmosphere percentage as related to the permanent wilting percentage. *Soil Science*: 56: 331-340, 1943.

RIPOLI, T.C.C.; RIPOLI, M.L.C. *Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente*. Piracicaba, 2004. 302 p.

ROQUE, A.A.O.; SOUZA, Z.M.; BARBOSA, R.S.; SOUZA, G.S. Controle de tráfego agrícola e atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 45: 744-750, 2010.

ROQUE, A.A.O.; SOUZA, Z.M.; ARAÚJO, F.S.; SILVA, G.R.V. Atributos físicos do solo e intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distrófico sob controle de tráfego agrícola. *Ciência Rural*, 41: 1536-1542, 2011.

ROSSETTO, R. Maturação da cana-de-açúcar. Disponível em: [http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01\\_90\\_22122006154841.html](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_90_22122006154841.html) . Acesso em: 10/08/2012.

SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C. F. M.; MOZAMBANI, A. E. Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J. C. M. (Org.). *Atualização em produção de cana-de-açúcar*. Piracicaba : CP. p. 11-18. 2006.

SERVADIO, P.; MARSILI, A.; PAGLIAI, M.; PELLEGRINI, S.; VIGNOZZI. Effect on some clay soil qualities following the passage of rubber-tracked and wheeled tractors in central Italy. *Soil & Tillage Research*, 61: 143-155, 2001.

SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; DIAS JUNIOR, M.S.; OLIVEIRA, L.F.C.; CASTRO, M.B. Pressão de preconsolidação e intervalo hídrico ótimo como indicadores de alterações estruturais do solo em decorrência das operações de colheita da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32: 1419-1427, 2008.

SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; CURI, N.; DIAS JÚNIOR, M.S. Potencial de uso e qualidade estrutural de dois solos cultivados com cana-de-açúcar em Goianésia, GO. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33: 159-168, 2009.

SEVERIANO, E. C. *Alterações estruturais de Latossolos representativos da região do Cerrado e potencial de uso de solos cultivados com cana-de-açúcar*. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Departamento de Ciência do Solo, Universidade de Lavras, MG. 134 p. 2010.

SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; DIAS JÚNIOR, M.S.; COSTA, K.A.P.; SILVA, F.G.; FERREIRA FILHO, S.M. Structural changes in latosols of the Cerrado region: I – relationships between soil physical properties and least limiting water range. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35: 783-791, 2011.

SILVA, A.J.N.; RIBEIRO, M.R. Caracterização de Latossolo Amarelo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar no estado de Alagoas: atributos morfológicos e físicos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 21: 677-684, 1997.

SILVA, A.P.; KAY, B.D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. *Soil Science Society American Journal*, 58: 1775-1781, 1994.

SILVA, A.P.; KAY, B.D. Effect of soil water content variation on the least limiting water range. *Soil Science Society American Journal*, 61: 884-888, 1997.

SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; IMHOFF, S. Intervalo hídrico ótimo. In: MORAES, M. H.; MÜLLER, M. M. L.; FOLONI, J. S. S. (Coord.) *Qualidade física do solo: métodos de estudo, sistemas de preparo e manejo do solo*. Jaboticabal: FUNEP, 2002. p. 1-20.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; TORMENA, C. A.; IMHOFF, S. Least limiting water range of soils. In: LAL, R. (Org.). *Encyclopedia of Soil Science*, 1: 1026-1029, 2006.

SILVA; R.B.; LANÇAS, K.P.; MIRANDA, E.E.V.; SILVA, F.A.M; BAIIO, F.H.R. Estimation and evaluation of dynamic properties as indicators of changes on soil structure in sugarcane fields of Sao Paulo State – Brazil. *Soil & Tillage Research*, 103: 265-270, 2009.



SILVA JÚNIOR, C.A.; CARVALHO, L.A.; MEURER, I.; LIBARDI, P.L.; SILVA, M.A.C.; OLIVEIRA, E.C.A. Alterações nos atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob diferentes métodos de preparo para o plantio da cana-de-açúcar. *Agrarian*, 3: 111-118, 2010.

SOUZA, Z.M.; PRADO, R.M.; PAIXÃO, A.C.S.; CESARIN, L.G. Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 40: 271-278, 2005.

SOUZA, Z.M.; BEUTLER, A.N.; PRADO, R.M.; BENTO, M.J.C. Efeito de sistemas de colheita de cana-de-açúcar nos atributos físicos de um Latossolo Vermelho. *Científica*, 34: 31-38, 2006a.

SOUZA, Z.M.; CAMPOS, M.C.C.; CAVALCANTE, I.H.L.; MARQUES JÚNIOR, J.; CESARIN, L.G.; SOUZA, S.R. Dependência espacial da resistência do solo à penetração e do teor de água do solo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar. *Ciência Rural*, 36: 128-134, 2006b.

SOUZA, G.S.; SOUZA, Z.M.; SILVA, R.B.; ARAÚJO, F.S.; BARBOSA, R.S. Compressibilidade do solo e sistema radicular da cana-de-açúcar em manejo com e sem controle de tráfego. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 47: 603-612, 2012.

SZMRECSÁNYI, T.; RAMOS, P.; RAMOS FILHO, L.O.; VEIGA FILHO, A.A. *Dimensões, riscos e desafios da atual expansão canavieira*. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. 150 p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Fisiologia vegetal*. 4.ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 819p.

TERAMOTO, E. R. *Avaliação e aplicação de modelos de estimativa de produção de cana-de-açúcar (Saccharum spp) baseados em parâmetros do solo e clima*. 96 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2003.

TOPPA, E.V.B; JADOSKI, C.J.; JULIANETTI, A.; HULSHOF, T.; ONO, E.O.; RODRIGUES, J.D. Aspectos da fisiologia de produção da cana-de-açúcar (*Saccharum Officinarum* L.). *Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia*, 3: 217-223, 2010.

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*. 22: 573-581, 1998.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P & LIBARDI, P.L. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range. *Soil & Tillage Research*, 52: 223-232, 1999.

TORMENA, C.A.; ARAUJO, 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*, 31: 211-219, 2007.

TUBEILEH, A.; GROLEAU-RENAUD, V.; PLANTUREUX, S.; GUCKERT, A. Effect of soil compaction on photosynthesis and carbon partitioning within a maize-soil system. *Soil & Tillage Research*, 71: 151-161, 2003.

UNICA – União da Indústria da Cana-de-Açúcar. *Relatório final da safra 2011/2012 - Região Centro-Sul*. Disponível em: <http://www.unica.com.br/unicadata> . Acesso em: 03/10/2012.

VASCONCELOS, A.C.M. *Desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea de socas de cana-de-açúcar sob dois sistemas de colheita*. 2002. 140p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal.

VASCONCELOS, A.C.M.; CASAGRANDE, A.A.; PERECIN, D.; JORGE, L.C.; LANDELL, M.G.A. Avaliação do sistema radicular da cana-de-açúcar por diferentes métodos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 27: 849-858, 2003.

VASCONCELOS, A.C.M.; DINARDO-MIRANDA, L.L. *Dinâmica do desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar e implicações no controle de nematóides*. 2 ed. Americana: Adonis, 2011, 56 p.

WACLAWOVSKY, A.J.; SATO, P.M.; LEMBKE, C.G.; MOORE, P.H.; SOUZA, G.M. Sugarcane for bioenergy production: an assessment of yield and regulation of sucrose content. *Plant Biotechnology Journal*, 8: 1-14, 2010.

WINGLER, A. The function of trehalose biosynthesis in plantas. *Phytochemistry*, 60: 437-440, 2002.

## OBJETIVOS GERAIS

O presente estudo objetivou avaliar as alterações estruturais em um Latossolo Vermelho distroférico do município de Rio Verde, Goiás, através do monitoramento do conteúdo de água do solo em função dos limites críticos do Intervalo Hídrico Ótimo, e quantificar seus efeitos sobre o rendimento agrícola e tecnológico da primeira soqueira de cultivares de cana-de-açúcar com diferentes ciclos de maturação.

## MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na Fazenda Experimental do Campus Rio Verde do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano (IF Goiano), localizado no município de Rio Verde, Goiás (17° 48' de latitude Sul; 50° 54' de longitude Oeste, e 725 metros de altitude). O solo que recobre a área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho distroférico (Embrapa, 2006), com relevo pouco movimentado, o que favorece a expansão da canavicultura mecanizada. Sua caracterização química e física está apresentada na Tabela 1.

Adotando os critérios propostos por Köppen, o clima é classificado como Tropical de Savana, com inverno seco e verão chuvoso (Aw), com temperatura média anual entre 20 e 25°C e média pluviométrica anual acima de 1500 mm, sendo concentrada mais 80% do total das chuvas no período de novembro a maio.

**Tabela 1.** Caracterização física e química do Latossolo Vermelho distroférico cultivado com cana-de-açúcar, no município de Rio Verde, Goiás.

Profundidade (cm)	Dp (kg dm <sup>-3</sup> )	Granulometria						Ataque sulfúrico					
		AMG	AG	AM	AF	AMF	Silte	Argila	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ki	Kr
		----- (g kg <sup>-1</sup> ) -----											
0 – 20	2,80	0	17	190	146	43	237	367	40,5	203,6	204,0	0,34	0,21
20 – 40	2,82	0	16	183	142	42	150	468	38,8	200,5	214,7	0,33	0,20

Dp: Densidade de partículas; AMG: areia muito grossa; AG: areia grossa; AM: areia média; AF: areia fina; AMF: areia muito fina; Ki: relação molecular (SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); Kr: relação molecular SiO<sub>2</sub>: (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). A granulometria foi determinada por tamisagem e pelo método da pipeta e a densidade de partículas pelo método do balão volumétrico.

Para a condução do ensaio, selecionou-se uma área de 2300 m<sup>2</sup>, que antes do plantio da cana-de-açúcar, foi cultivada por 10 anos com citros. A área submetida à calagem para a correção da acidez do solo baseada na análise de sua fertilidade (Tabela

2). Em seguida, foi realizado um cultivo prévio na área com crotalária, com fins de adubação verde, e preparo do solo através das operações de subsolagem cruzada a 40 centímetros de profundidade, uma aração e duas gradagens. Na sequência, o solo foi sulcado a 30 centímetros de profundidade e adubado para o plantio da cana-de-açúcar, conforme recomendações de Sousa & Lobato (2004), para uma expectativa de rendimento superior a 120 Mg ha<sup>-1</sup>. As fontes utilizadas foram Ureia, Superfosfato Simples, Cloreto de Potássio e Bórax.

**Tabela 2.** Complexo sortivo do Latossolo Vermelho distroférico antes do cultivo da cana-de-açúcar, no município de Rio Verde, Goiás<sup>(1)</sup>.

Ca	Mg	Al	H+Al	P	K	V <sup>(1)</sup>	m <sup>(2)</sup>	M.O. <sup>(3)</sup>	pH (H <sub>2</sub> O)
----- cmolc dm <sup>-3</sup> -----				----- mg dm <sup>-3</sup> -----		----- % -----	----- g kg <sup>-1</sup> -----		
0 a 20 cm									
4,2	1,6	0,1	3,6	22,0	254,5	64,3	2,0	46,0	6,5
20 a 40 cm									
1,6	0,6	0,1	4,0	3,7	98,0	38,9	4,0	34,0	6,2

<sup>(1)</sup> V: saturação por bases; <sup>(2)</sup> m: saturação por alumínio; <sup>(3)</sup> M.O.: Matéria Orgânica. P: Determinado pelo extrator Mehlich.

Em março de 2010, procedeu-se o plantio dos cultivares de cana-de-açúcar, em parcelas com dimensões de 4,5 metros de comprimento e 7,5 metros de largura, com 6 linhas de plantas espaçadas a 1,5 metros e carregadores de 5 metros.

O experimento foi disposto em esquema fatorial 3 x 4, sendo 3 cultivares de cana-de-açúcar, definidas através do seu ponto de maturação (precoce, média e tardia) e 4 graus de compactação do solo obtidos através do tráfego de um trator agrícola Agrale, modelo 4230 e tara de 1,9 Mg, correspondentes às seguintes intensidades de tráfego (Beutler et al., 2007, adaptado por Gonçalves et al., 2011):

- T<sub>0</sub> = sem compactação;
- T<sub>2</sub> = 2 passadas;
- T<sub>10</sub> = 10 passadas;
- T<sub>20</sub> = 20 passadas do trator no mesmo lugar, e uma ao lado da outra, perfazendo toda a superfície da parcela.

Os tratamentos foram dispostos em três repetições, totalizando 36 parcelas distribuídas no delineamento em blocos ao acaso. Os tratamentos de tráfego somente foram aplicados logo após a primeira colheita da cana-de-açúcar.

As diversas etapas da condução do experimento podem ser visualizadas na Figura 3.



**Figura 3.** Etapas sequenciais de condução do experimento cultivado com cana-de-açúcar, sobre um Latossolo Vermelho distroférico, no município de Rio Verde, Goiás. A: área experimental. B: subsolagem da área. C: aplicação de calcário. D: incorporação do calcário. E: sulcação da área. F: plantio das mudas. G: sulcos de plantio contendo as mudas. H: visão geral do experimento. I: colheita manual da cana-de-açúcar. J: trator agrícola utilizado na aplicação dos níveis de tráfego. K: compactação do solo das parcelas experimentais. L: parcela experimental após a aplicação do tratamento de tráfego.

Os cultivares avaliados, tratavam-se dos híbridos da antiga Planalsucar, atual RIDESA – Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro, a saber (Hoffmann et al., 2008):

- *RB. 83-5054*: híbrido de ciclo precoce - apresenta touceiramento médio, com colmos eretos, pouco empalhados, de fácil despalha, de diâmetro médio, e de cor verde clara, com mancha de cera escurecida quando exposta ao sol. Possui bom comportamento como cana-de-ano, alta produtividade agrícola e industrial (alto

teor de sacarose e médio teor em fibras), resistente às principais doenças que acometem a cultura, possui difícil florescimento, exigente em condições de fertilidade e tombamento eventual;

- *RB. 84-5210*: híbrido de ciclo médio - apresenta hábito de crescimento semiereto, com touceira ligeiramente aberta, com despalha regular e bainhas levemente arroxeadas. Possui alta produtividade agrícola e industrial. Adapta-se bem a locais de fertilidade intermediária, a espaçamentos reduzidos, à colheita mecanizada, com bom diâmetro e uniformidade dos colmos. Apresenta tombamento eventual e resistência às principais doenças que acometem a cultura;
- *RB. 86-7515*: híbrido de ciclo tardio - com alta velocidade de crescimento, porte alto, hábito de crescimento ereto, alta densidade de colmos, de cor verde arroxeadado que se acentua quando expostos e fácil despalha. Tolerante à seca e boa brotação de soqueira, alto teor de sacarose, crescimento rápido com alta produtividade. Nos ambientes de alto potencial de produção há possibilidades, pela alta produtividade agrícola, de tombamento e atraso de maturação.

A escolha dos mesmos se baseou na duração do seu ciclo, que finaliza no início (maio), no meio (junho a setembro) e no final (setembro) de safra convencional da cana-de-açúcar (Hoffmann et al., 2008). Tais épocas representam, na região sudoeste do estado de Goiás, o final, a ausência e o início do período chuvoso, fase em que o solo se encontra com diferentes conteúdos de água e, portanto, sob diversas condições de suscetibilidade à compactação.

Durante o ciclo da cana-planta, os cultivares foram conduzidos normalmente, evitando o tráfego de maquinário sobre as parcelas quando da execução dos tratamentos fitossanitários, a saber: adubação de cobertura nitrogenada ( $60 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$  – ureia), realizada manualmente aos 60 dias após o plantio; controle químico da cigarrinha-das-raízes (*Mahanarva fimbriolata*) utilizando um inseticida da Classe dos Neonicotinoides (Thiamethoxam,  $250 \text{ g kg}^{-1}$ ), com auxílio de bomba costal; liberação do parasitoide (*Cotesia flavipes*) da broca-da-cana-de-açúcar (*Diatraea saccharalis*) e ceifa manual e controle químico das plantas invasoras (com destaque para o capim colônia, *Panicum maximum*; a beldroega, *Portulaca oleracea*; o capim-timbête, *Cenchrus echinatus*; e o caruru-de-espinhos, *Amaranthus spinosa*) com o uso de enxada e de herbicidas seletivos para a cana-de-açúcar (Mesotriona e Metribuzim,  $480 \text{ g L}^{-1}$ ), também aplicados com

pulverizador costal, notadamente no início do ciclo da cultura. O manejo da vegetação infestante dos carregadores foi feito mecanicamente, utilizando-se roçadeira tracionada por trator.

Após o primeiro ano de cultivo, cada cultivar foi colhido obedecendo ao índice de maturação (IM), que foi de 0,80 (atingido em abril de 2011); 1,03 (em julho de 2011) e 0,86 (em outubro de 2011) no momento do 1º corte, para os cultivares de ciclo precoce, médio e tardio, respectivamente. Tal determinação partiu da quantificação do brix do ápice e da base de três colmos por parcela, quinzenalmente, a partir dos 270 dias de cultivo. Utilizou-se um refratômetro portátil, da marca Atago, modelo PAL-1.

A colheita foi realizada manualmente, rente ao solo, com o auxílio de podões. Em seguida, procedeu-se à aplicação de uma lâmina de água de 80 mm, para o salvamento das soqueiras (Oliveira et al., 2012), com o objetivo de promover a brotação das mesmas. Utilizou-se, para tanto, um tanque tracionado por trator. Foi realizada uma adubação de manutenção para a nutrição dos novos perfilhos durante o ciclo das soqueiras, para uma expectativa de rendimento superior a 80 Mg ha<sup>-1</sup> (Sousa & Lobato, 2004). Para tanto, foram abertos pequenos sulcos, paralelos e à montante das linhas de cultivo, com uma profundidade de 10 centímetros. Após receber os fertilizantes, os mesmos foram fechados. Os fertilizantes utilizados foram os mesmos descritos para o plantio do experimento.

Aproveitando a umidade do solo da irrigação, realizou-se a aplicação de um herbicida de caráter pré-emergente (Tebutiurum, 500 g L<sup>-1</sup>), visando ao atraso da emergência das plantas invasoras, o que reduziu a competição das mesmas com a cultura principal. Para isso, o solo passou por um rastelamento manual prévio, de forma a retirar das parcelas experimentais, toda a palhada advinda da colheita da cana-planta. Esta prática veio a facilitar o contato do herbicida com o solo úmido e a minimizar o efeito dissipador de carga da palhada de cana sobre a etapa de compactação do solo.

A irrigação de salvamento permitiu, ainda, a aplicação dos níveis de tráfego do trator agrícola supracitado, pela ação lubrificante da molécula de água entre as partículas do solo, predispondo o solo à compactação (Severiano, 2010). O solo foi trafegado em toda a extensão das entrelinhas de cultivo da cana-de-açúcar, deixando sem pisoteio as linhas de crescimento das soqueiras, com a largura de aproximadamente 20 centímetros. Depois de trafegadas, a palha antes retirada, foi repostada nas parcelas correspondentes, simulando o que ocorre em condições reais de colheita mecanizada de cana crua.



Aproximadamente depois de um mês de aplicados os tratamentos de compactação para cada época de colheita, foram realizadas amostragens em dois pontos de cada parcela, nas posições linha (L) e entrelinha de cultivo de cana (EL). Na posição L, o ponto de coleta se situou no centro da linha de cultivo, paralelamente à posição EL, cujas amostras foram colhidas no centro da segunda entrelinha de cultivo da cana (entre a segunda e a terceira linha de cultivo), em todas as parcelas. Nestas posições, nas camadas de 0 a 10 e 10 a 20 centímetros, coletou-se amostras do solo indeformadas em anéis volumétricos de 6,4 centímetros de diâmetro e 5,0 centímetros de altura, totalizando 144 amostras. Após a retirada das amostras, as mesmas foram envolvidas em filme de PVC, parafinadas e acondicionadas em caixas de isopor para transporte e armazenamento no laboratório, e foram submetidas às análises físico-hídricas do solo.

Em laboratório, as amostras indeformadas foram preparadas, retirando o excesso de solo de suas arestas. O material excedente foi utilizado para a caracterização física do solo (Tabela 1) e para a determinação do Ponto de Murcha Permanente (potencial matricial de -1,5 MPa), no Laboratório de Física do Solo da Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais. Nesta determinação, foi utilizado o Extrator de Richards (Embrapa, 2011).

Na sequência, as amostras foram saturadas em bandejas de alumínio, através da elevação gradativa de uma lâmina de água destilada até a altura de 2/3 dos cilindros. Após a saturação, as mesmas foram submetidas ao potencial mátrico de -0,006 MPa para a determinação da microporosidade e capacidade de campo (Mello et al., 2002; Embrapa, 2011).

Posteriormente foi realizado o ajuste das amostras a conteúdos de água no solo numa amplitude de 0,05 a 0,43  $\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$ , para então serem submetidas, em cada tensão dentro do intervalo proposto, ao teste de penetrometria. Para tanto, utilizou-se um penetrômetro de bancada MARCONI-MA 933, dotado de variador eletrônico de velocidade e sistema de registro de dados, segundo Tormena et al. (1998).

Então, as amostras foram secas em estufa, a 105°C, por 48 horas, para a determinação da densidade do solo ( $D_s$ ), conforme Embrapa (2011). A porosidade total (PT) foi determinada pela equação 1:

$$PT = [1 - (D_s/D_p)] \quad \text{Eq. (1)}$$

sendo  $D_p$  a densidade de partículas. A macroporosidade do solo foi obtida pela diferença entre  $PT$  e microporosidade, segundo Embrapa (2011).

A curva de resistência à penetração (CRP) foi obtida relacionando os valores de resistência à penetração (RP) em função do conteúdo volumétrico de água ( $\theta$ ) e da  $D_s$ , seguindo o modelo não linear proposto por Busscher (1990) (Equação 2), através da ferramenta Solver do Microsoft Excel<sup>®</sup>:

$$RP = 0,5545 D_s^{4,6924} \theta^{-0,5576}; \quad r^2 = 0,75^{**} \quad \text{Eq. (2)}$$

Tal modelo é adequado para representar a RP, uma vez que seus valores variam muito com pequenas alterações na umidade e na densidade do solo (Klein et al., 1998).

A água disponível foi determinada pela diferença entre os conteúdos volumétricos de água na capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ) e no ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ), seguindo o proposto por Severiano et al. (2008).

O Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) foi determinado de acordo com os procedimentos descritos em Silva et al. (2006), considerando como limites superiores, o conteúdo de água no solo retido no potencial matricial de -0,006 MPa como sendo a capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ) (Severiano et al., 2011) ou aquele em que a porosidade de aeração ( $\theta_{PA}$ ) é de 10 % (Grable & Siemer, 1968), calculado para cada amostra pela equação 3:

$$\theta_{PA} = PT - 0,1 \quad \text{Eq. (3)}$$

Como limites inferiores, foram considerados o conteúdo de água retido no potencial matricial de -1,5 MPa, o ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ) (Richards & Weaver, 1943), e/ou o conteúdo de água correspondente à resistência à penetração de 2,5 MPa ( $\theta_{RP}$ ) (Camargo & Alleoni, 1997), cujos valores foram utilizados na Equação 2.

O IHO foi obtido ajustando os limites do conteúdo de água no solo em função da  $D_s$ , sendo o limite superior o menor valor entre  $\theta_{CC}$  e  $\theta_{PA}$ , e o limite inferior o maior valor entre  $\theta_{PMP}$  e  $\theta_{RP}$ , considerando os valores médios da camada de 0 a 20 centímetros.

Por ocasião do início do período chuvoso, a partir de setembro de 2011, para os cultivares de ciclo precoce e médio e a partir de outubro de 2011, para o cultivar tardio, iniciou-se o monitoramento do conteúdo de água no solo ( $\theta$ ), que se estendeu até a colheita das soqueiras de cada cultivar, segundo adaptação de metodologia proposta por

Blainski et al. (2009). O monitoramento teve frequência semanal de coleta, avaliando a camada de 0 a 20 centímetros, com o auxílio de um amostrador semiautomático de solo elétrico, marca Saci, modelo S-20. As amostras foram embaladas e conduzidas ao laboratório para determinação da umidade gravimétrica, conforme Embrapa (2011).

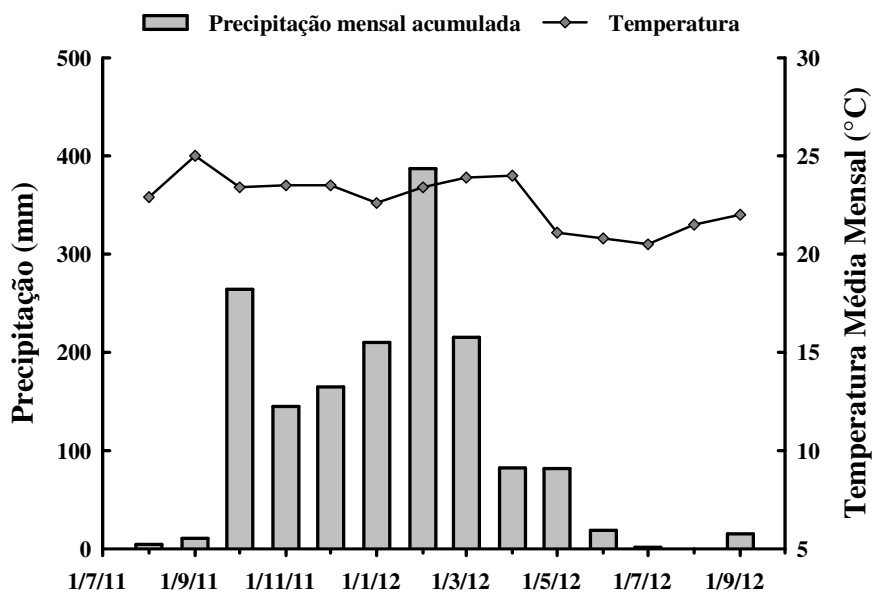
Para a obtenção de um valor padrão de IHO ajustando seus limites superiores e inferiores para cada nível de tráfego e em cada profundidade ( $N^\circ$  passadas em função da profundidade), e, ainda, nas duas posições de amostragem (linha e entrelinha de cultivo). O IHO foi considerado como parâmetro de referência na determinação da frequência de ocorrência de  $\theta$  dentro da amplitude de água disponível durante o ciclo da cana-de-açúcar ( $F_{dentro}$ ), conforme (Silva & Kay, 1997). Dividiu-se então o período de monitoramento em fase vegetativa (FV) e de maturação (FM) da cultura, segundo Diola & Santos (2012).

Ao final do ciclo das soqueiras de cada cultivar (maturação), procedeu-se à colheita das mesmas, que se deu nos meses de maio, junho e setembro de 2012, para os cultivares precoce, médio e tardio, respectivamente. A tomada de decisão quanto ao momento do corte foi novamente baseada no índice de maturação ( $IM = 0,83; 0,90$  e  $0,92$ , para os cultivares de ciclo precoce, médio e tardio, respectivamente).

Por ocasião de cada colheita, foi quantificado o peso dos colmos presentes nas duas linhas centrais de cada parcela, cujo valor foi extrapolado para quilos por hectare. Para tanto, realizou-se o corte o mais rente possível do solo, conforme descrito para condições de cana-planta. Os colmos foram então despalhados e tiveram o ponteiro destacado. Em seguida, foram pesados em balança digital tipo gancho, marca Soil Control (precisão = 0,02 kg), com capacidade de 50 kg.

Ainda nas duas linhas centrais de cada parcela, foram coletados 10 colmos para a determinação das variáveis tecnológicas da cana-de-açúcar. Os mesmos foram enviados ao Laboratório de Qualidade Industrial de Cana-de-Açúcar da Usina Santa Helena, pertencente ao Grupo Naoum, localizada no município de Santa Helena de Goiás, Goiás. Determinou-se então, segundo metodologia descrita por Consecana (2006), os parâmetros de qualidade industrial, a saber, Brix (B); Pol do caldo (S); Pol da cana (PC); Pureza do caldo (Q); Açúcares Totais Recuperáveis (ATR); Fibra da cana (F); Açúcares Redutores do caldo (AR) e os Açúcares Redutores da Cana (ARC).

Foram monitoradas ainda, durante a condução do ensaio, a temperatura média mensal e a precipitação pluviométrica. Os resultados são apresentados na Figura 4.



**Figura 4.** Precipitação pluviométrica (mm) e temperatura média mensal (°C) durante o cultivo da cana-de-açúcar, no município de Rio Verde, Goiás.

Os resultados das variáveis produtivas e tecnológicas dos cultivares de cana-de-açúcar e os atributos físicos do solo foram submetidos à análise de variância, segundo delineamento em blocos ao acaso, esquema fatorial, comparando as médias pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ) quando constatada significância.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A compactação do solo alterou as propriedades físicas do solo na entrelinha de cultivo da cana, notadamente na camada de 0 a 10 cm (Tabela 3). Na linha de cultivo, não houve alteração dos atributos físico-hídricos, mantendo uma densidade do solo (Ds) média de 1,00 e de 1,05 kg dm<sup>-3</sup> nas camadas de 0 a 10 e de 10 a 20 cm de profundidade, concordando com Correchel et al. (1999), que observou menores valores de Ds na linha de plantio do milho.

Na entrelinha de cultivo, para camada de 0 a 10 cm, não houve diferença entre os valores de Ds entre os três cultivares de cana, para cada nível de passadas. Por isso, trabalhou-se com uma média de Ds representativa de cada intensidade de tráfego e em cada camada, para o estabelecimento do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) correspondente a cada situação.

Por outro lado, a aplicação dos tratamentos de compactação do solo, culminou com resultados de Ds diferentes com o incremento da intensidade de tráfego (T<sub>0</sub> a T<sub>20</sub>), denotados a partir do tratamento com 10 passadas.

Comportamento semelhante foi detectado na avaliação da porosidade total do solo (PT) e da macroporosidade (Macro), porém num sentido inverso (Tabela 3), visto que, com o aumento da Ds, há uma diminuição dos valores de PT e Macro (Oliveira et al., 2007). Ambos atributos já sofreram alteração com o menor nível de tráfego (T<sub>2</sub>), com decréscimo, neste nível de tráfego, de 6 e 26% da porosidade total e da macroporosidade, respectivamente. A redução total (T<sub>0</sub> a T<sub>20</sub>) de PT e Macro foi de 9,5 e 39%, respectivamente.

A microporosidade (Micro) foi alterada apenas no tratamento T<sub>20</sub>, que apresentou diferença somente em relação ao tratamento sem tráfego (T<sub>0</sub>). O incremento na quantidade de microporos foi de apenas 7,5%. O aumento da microporosidade, às

expensas dos macroporos, pode ser benéfico por aumentar a retenção de água em solos porosos e altamente intemperizados (Oliveira et al., 2004).

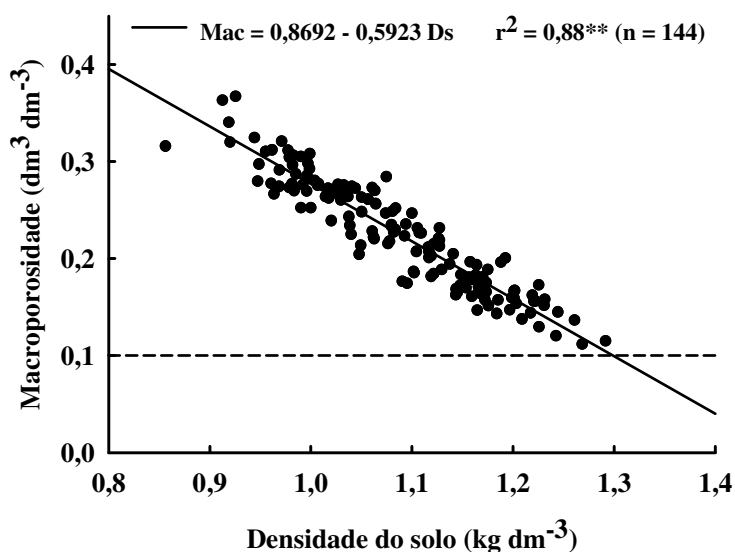
**Tabela 3.** Atributos físicos do Latossolo Vermelho distroférico na entrelinha de cultivo da cana-de-açúcar, após o tráfego do trator Agrale 4230, no município de Rio Verde, Goiás<sup>(1)</sup>.

Nº de passadas	Ds <sup>(2)</sup> -----kg dm <sup>-3</sup> -----			PT <sup>(3)</sup> -----			Micro <sup>(4)</sup> ----- m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> -----			Macro <sup>(5)</sup> -----		
	P <sup>(6)</sup>	M <sup>(7)</sup>	T <sup>(8)</sup>	P	M	T	P	M	T	P	M	T
0 a 10 cm												
0	1,05 aB	1,12 aB	1,06 aB	0,63 aA	0,60 aA	0,62 aA	0,40 aB	0,41 aA	0,39 aB	0,23 aA	0,19 bA	0,22 abA
2	1,14 aAB	1,12 aB	1,14 aAB	0,59 aB	0,60 aA	0,59 aAB	0,42 aAB	0,42 aA	0,41 aAB	0,17 aB	0,18 aA	0,19 aAB
10	1,16 aA	1,18 aAB	1,17 aA	0,58 aB	0,58 aAB	0,58 aB	0,42 aAB	0,42 aA	0,43 aA	0,16 aB	0,16 aAB	0,15 aB
20	1,21 aA	1,26 aA	1,19 aA	0,57 aB	0,55 aB	0,58 aB	0,43 aA	0,42 abA	0,41 bAB	0,14 abB	0,13 bB	0,17 aB
10 a 20 cm												
0	1,07 aA	1,15 aA	1,17 aA	0,62 aA	0,59 aA	0,58 aA	0,39 aA	0,41 aA	0,41 aA	0,22 aA	0,19 aA	0,17 aA
2	1,12 aA	1,10 aA	1,16 aA	0,60 aA	0,61 aA	0,59 aA	0,40 aA	0,39 aA	0,41 aA	0,20 aA	0,22 aA	0,18 aA
10	1,13 aA	1,13 aA	1,15 aA	0,60 aA	0,59 aA	0,59 aA	0,41 aA	0,39 aA	0,41 aA	0,19 aA	0,20 aA	0,18 aA
20	1,16 aA	1,18 aA	1,14 aA	0,58 aA	0,58 aA	0,59 aA	0,40 aA	0,39 aA	0,39 aA	0,19 aA	0,18 aA	0,21 aA

<sup>(1)</sup> Dentro de cada profundidade e para cada atributo físico do solo, médias seguidas da mesma letra minúscula nas linhas e pela mesma letra maiúscula nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). <sup>(2)</sup> Densidade do solo. <sup>(3)</sup> Porosidade Total. <sup>(4)</sup> Microporos. <sup>(5)</sup> Macroporos. <sup>(6)</sup> Cultivar de ciclo precoce. <sup>(7)</sup> Cultivar de ciclo médio. <sup>(8)</sup> Cultivar de ciclo tardio.

Na entrelinha de cultivo, na profundidade de 10 a 20 cm, a compactação do solo não foi suficiente para alterar os atributos físicos desta camada, para todos os cultivares (Tabela 3).

A macroporosidade, na camada de 0 a 10 cm, foi o atributo mais intensamente alterado com a compactação do solo, resultado que reafirma a constatação de Carvalho et al. (1991), que este atributo é o mais alterado pelo cultivo contínuo da cana-de-açúcar. Assim, foi avaliada a variação da mesma em função da Ds (Figura 5). Observa-se que o volume de macroporos apresenta uma variação linear negativa com o incremento de Ds. Apesar disso, nas condições experimentais avaliadas, os valores de Macro foram superiores ao limite crítico de 10% (Oliveira et al., 2003) em todos os tratamentos de tráfego.

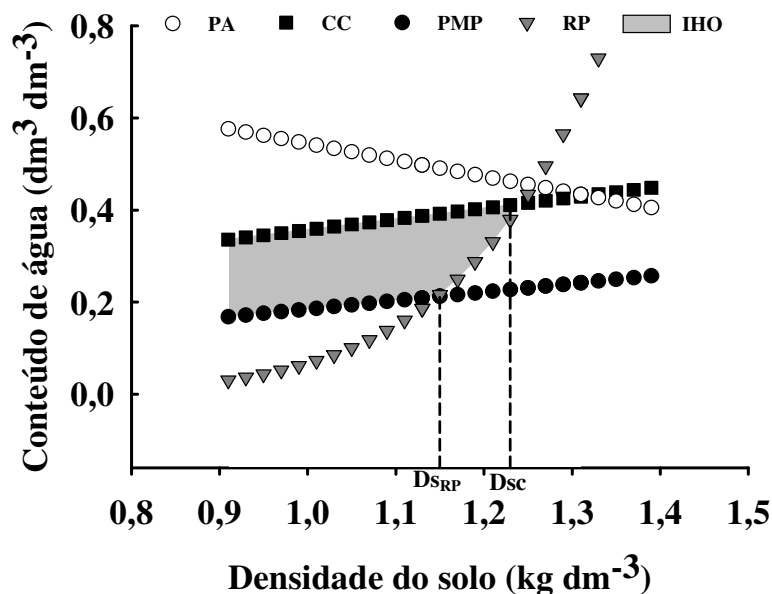


**Figura 5.** Macroporosidade do solo em função da sua densidade (Ds), para o Latossolo Vermelho distroférico, cultivado com cana-de-açúcar, no município de Rio Verde, Goiás.

O IHO para o solo em estudo é mostrado na Figura 6. Observa-se que houve decréscimo do IHO com o incremento da densidade do solo, quando  $\theta_{PA}$  variou negativamente, ao passo que  $\theta_{CC}$ ,  $\theta_{PMP}$  e  $\theta_{RP}$  variaram positivamente. Resultados semelhantes foram observados por Tormena et al. (2007).

A resistência à penetração é o parâmetro que mais afeta a amplitude do IHO (Tormena et al., 1998). Nas condições experimentais, a RP passou a limitar a faixa de água disponível às plantas, a partir da densidade de  $1,15 \text{ kg dm}^{-3}$  ( $D_{SRP}$ ), quando se tornou o limite inferior do IHO. A porosidade de aeração não afetou o IHO na faixa de Ds encontrada no experimento, substituindo a capacidade de campo, como limite superior, num valor de Ds superior à Ds crítica ( $D_{sc}$ ), que foi de  $1,23 \text{ kg dm}^{-3}$ , a partir de quando o IHO é nulo. Resultados semelhantes foram obtidos por Petean et al. (2010) e Lima et al. (2012), para solos de textura argilosa.

Estas constatações corroboram com a afirmação de que, em solos tropicais, o limite superior do IHO é o conteúdo de água na capacidade de campo e, na parte inferior, o mesmo é limitado, em sua maior parte, pela resistência mecânica do solo à penetração (Freddi, 2007).



**Figura 6.** Variação do conteúdo de água no solo ( $\theta$ ) com o incremento da Densidade do solo ( $D_s$ ), nos limites críticos de capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ , -0,006 MPa), ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ , -1,5 MPa), porosidade de aeração a 10% ( $\theta_{PA}$ ) e resistência do solo à penetração de 2,5 MPa ( $\theta_{RP}$ ), do Latossolo Vermelho distroférico cultivado com cana-de-açúcar, no município de Rio Verde, Goiás. A área hachurada representa o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO);  $D_{sc}$ : densidade crítica ao desenvolvimento das plantas;  $D_{SRP}$ : densidade em que o limite inferior do IHO é limitado pela  $\theta_{RP}$ .

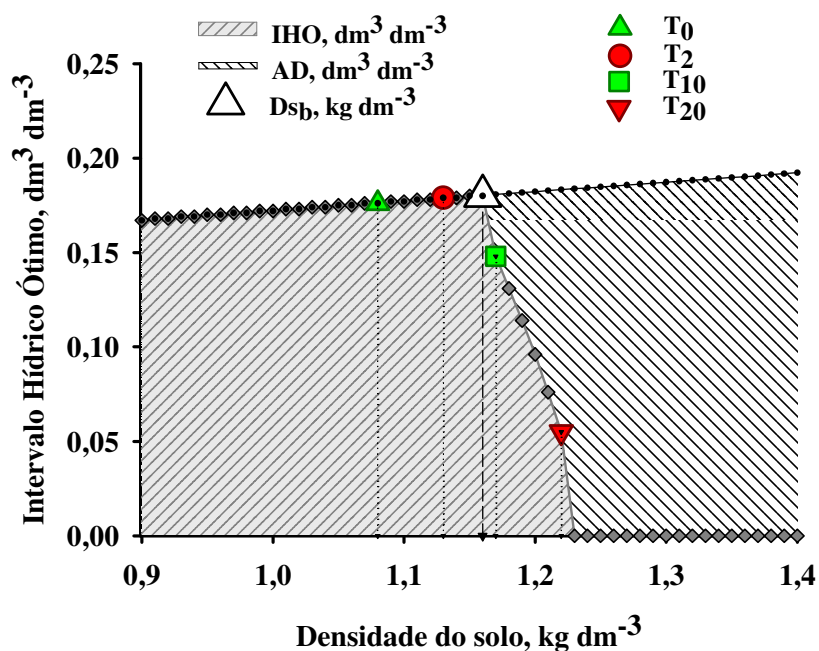
Avaliando o IHO em função da  $D_s$  (Figura 7), observa-se que há um incremento da amplitude do IHO até o valor de  $1,15 \text{ kg dm}^{-3}$ , a partir de onde sua magnitude começa a decrescer, até o valor da  $D_{sc} = 1,23 \text{ kg dm}^{-3}$ . Tal valor de densidade, é considerado a  $D_s$  benéfica ( $D_{sb} = 1,15 \text{ kg dm}^{-3}$ ), por aumentar a retenção de água em Latossolos oxídicos, altamente porosos sob condições naturais (Severiano et al., 2011).

Observa-se ainda (Figura 7), a posição de cada tratamento de tráfego dentro do IHO para a camada em que ocorreram as alterações físicas mais expressivas (0 a 10 cm). Nota-se que os níveis de 0 e 2 passadas de trator ( $T_0$  e  $T_2$ ) não foram suficientes para atingir a condição de solo estruturalmente adequado, aplicando o conceito da  $D_{sb}$ . Por outro lado, os tratamentos  $T_{10}$  e  $T_{20}$ , apesar de danosos à qualidade física do solo, não expuseram a cana-de-açúcar às condições extremas de estresse hídrico (IHO = 0). Entretanto, com 20 passadas dos rodados no mesmo lugar, o valor médio de  $D_s$  alcançou  $1,22 \text{ kg dm}^{-3}$ , muito próximo a  $D_{sc}$  de  $1,23 \text{ kg dm}^{-3}$ .

A Água Disponível ( $AD = \theta_{CC} - \theta_{PMP}$ ) variou fraca e positivamente com o aumento de  $D_s$ , não sendo, portanto, um parâmetro sensível às alterações estruturais do solo, quando comparado ao IHO (Tormena et al., 2007) (Figura 7). A influência positiva da  $D_s$  sobre a AD é pela redistribuição dos poros por tamanho, principalmente pelo



aumento da microporosidade, que incrementa a capacidade de retenção de água do solo (Leão et al., 2004).



**Figura 7.** Variação do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) e da Água Disponível (AD) em função da densidade do Latossolo Vermelho distroférico cultivado com cana-de-açúcar, no município de Rio Verde, Goiás. Dsb: densidade do solo benéfica; T<sub>0</sub> = 0, T<sub>2</sub> = 2, T<sub>10</sub> = 10 e T<sub>20</sub> = 20 passadas de trator no mesmo lugar.

O monitoramento do conteúdo de água do solo em função dos limites críticos do IHO é mostrado nas Figuras 8 e 9, para a entrelinha (EL) e para a linha (L) de cultivo de cana-de-açúcar, respectivamente. Foram destacados, para cada cultivar, os períodos correspondentes à fase vegetativa das soqueiras (fases de brotação, perfilhamento e crescimento de colmos) e à fase de maturação das mesmas, verificada nos dois últimos meses de cultivo. Esta divisão fenológica se baseia no caráter diferenciado de requerimento hídrico da cana-de-açúcar, nos estádios vegetativo e de acúmulo de sacarose (Diola & Santos, 2012).

Para a posição EL, na profundidade de 0 a 10 cm (Figura 8), observa-se que a partir de 10 passadas de trator (T<sub>10</sub>), há redução da amplitude do IHO, aumentando a frequência de ocorrência da umidade do solo fora dos seus limites. Este comportamento foi agravado com a passagem do trator 20 vezes no mesmo lugar (T<sub>20</sub>). Somente em T<sub>20</sub>, houve ocorrência expressiva de pontos de umidade fora dos limites do IHO, durante a fase vegetativa das soqueiras, período em que são altamente sensíveis ao déficit hídrico.

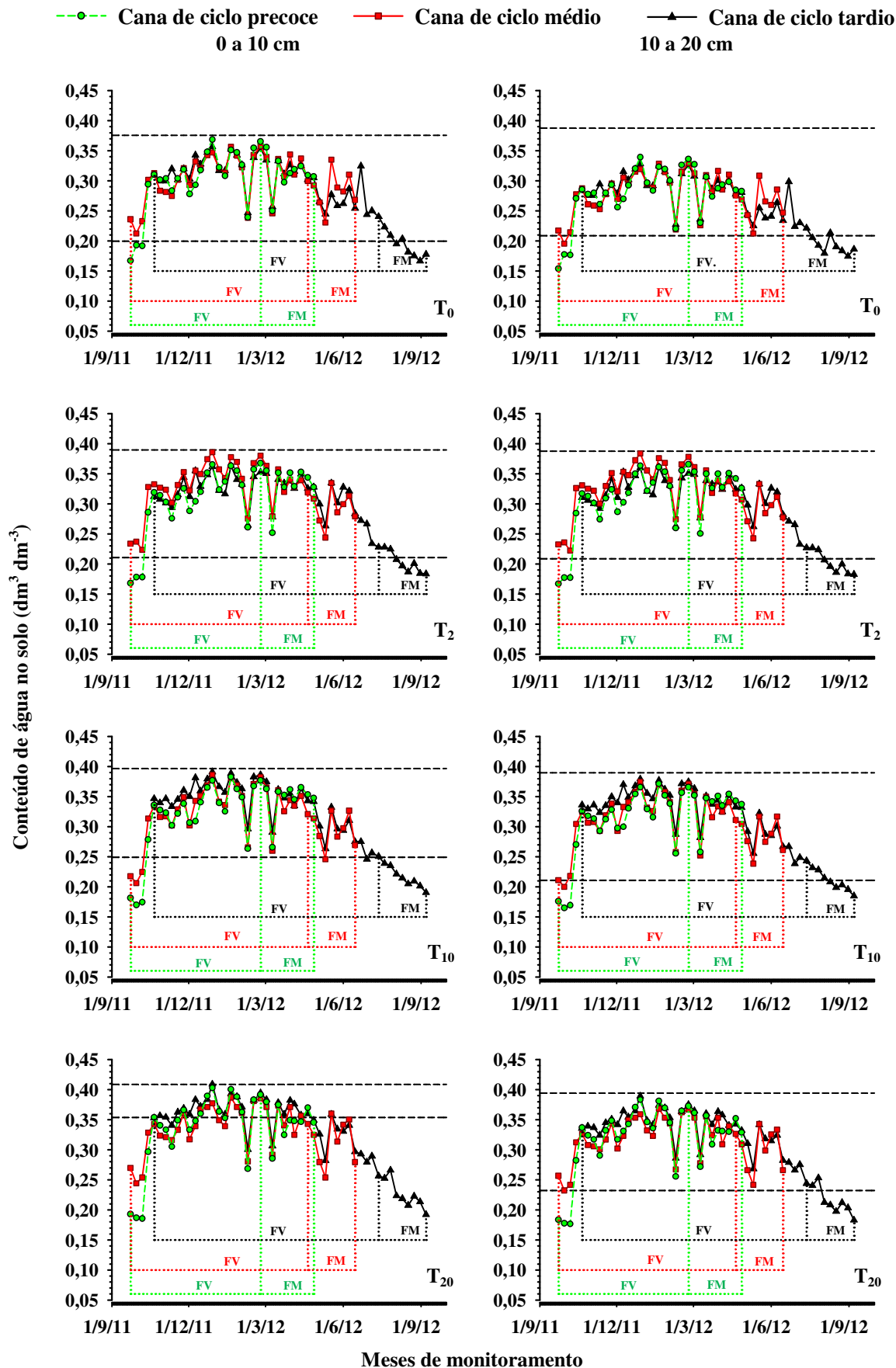
Nos tratamentos de menor intensidade de tráfego, detectou-se ocorrência de déficit hídrico curto, particularmente para os meses de setembro e outubro (Figura 4) na

fase vegetativa dos cultivares de ciclo precoce e médio. Este comportamento é explicado por se tratar de final da estação seca, quando a disponibilidade hídrica do solo é naturalmente baixa. Por outro lado, o cultivar de ciclo tardio sofreu déficit de água, em todos os níveis de tráfego, na fase final de maturação. Este estresse é interessante para o acúmulo de sacarose, segundo a fisiologia da cana-de-açúcar (Segato et al., 2006a).

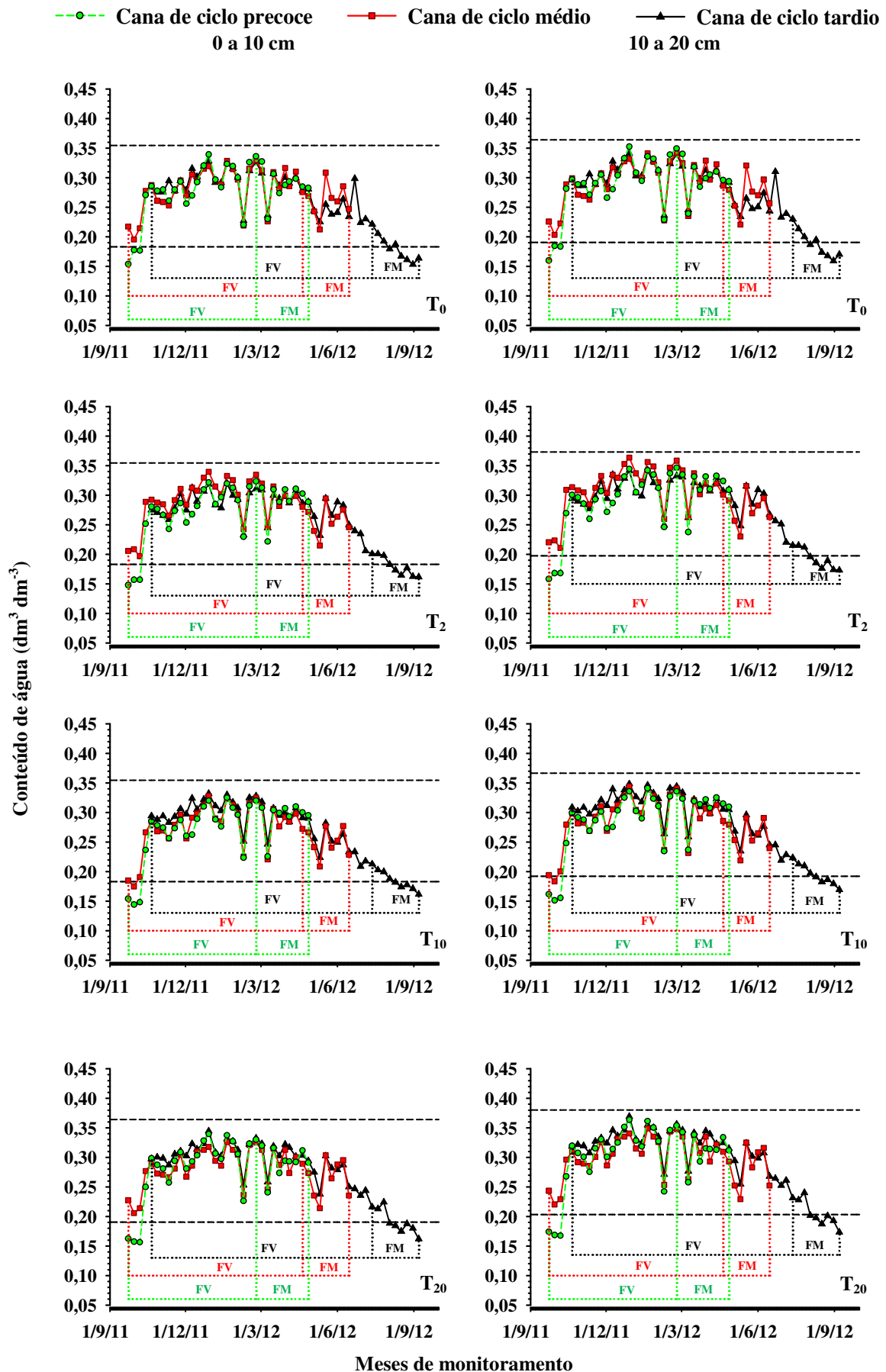
Para a camada de 10 a 20 cm, posição EL, não houve detecção de pontos de umidade fora do IHO, salvo nos meses de baixa precipitação pluviométrica (Figura 8). Estes resultados reafirmam as pequenas alterações de  $D_s$  na camada inferior a 10 cm (Tabela 3), não alterando a magnitude do IHO.

Comportamento semelhante foi observado no solo da linha de cultivo das soqueiras (posição L) em todos os tratamentos avaliados, que, por não ser trafegado, não apresentou os efeitos danosos da compactação do solo, mantendo o IHO em níveis adequados (Figura 9). Nestes locais, a manutenção de  $\theta$  dentro dos limites do IHO proporciona o adequado crescimento das plantas, que é menos restrito dentro desta faixa de água (Silva et al., 1997).

Em todas as situações avaliadas (Figuras 8 e 9), somente parte do período de maturação do cultivar de ciclo tardio esteve em condições de umidade fora dos limites do IHO, configurando déficit hídrico, numa fase em que este estresse é desejado. Os demais cultivares alcançaram o ponto de colheita em condições de boa disponibilidade hídrica.



**Figura 8.** Variação temporal do teor de água no solo em relação aos limites críticos do Intervalo Hídrico Ótimo, para as amostras da entrelinha de cultivo (EL) da cana-de-açúcar. FV: Fase Vegetativa. FM: Fase de Maturação.  $T_0$ ,  $T_2$ ,  $T_{10}$  e  $T_{20}$  se referem ao número de passadas do trator Agrale 4230 sobre o solo.



**Figura 9.** Variação temporal do teor de água no solo em relação aos limites críticos do Intervalo Hídrico Ótimo, para as amostras da linha de cultivo (L) da cana-de-açúcar. FV: Fase Vegetativa. FM: Fase de Maturação.  $T_0$ ,  $T_2$ ,  $T_{10}$  e  $T_{20}$  se referem ao número de passadas do trator Agrale 4230 sobre o solo.

A frequência percentual de ocorrência do conteúdo de água do solo dentro dos limites do IHO (Fdentro), para o período avaliado, encontra-se na Tabela 4. Em acordo com as Figuras 8 e 9, os valores de Fdentro da camada de 0 a 10 cm vieram a decrescer no tratamento T<sub>10</sub> e a se agravar no T<sub>20</sub>, quando avaliados na posição EL. Nestas condições, o IHO sofreu reduções de 16 e 69%, para 10 e 20 passadas, respectivamente, em comparação ao T<sub>0</sub>.

**Tabela 4.** Intervalo hídrico ótimo e análise da frequência de  $\theta$  dentro dos limites do IHO (Fdentro) durante o ciclo da cana-de-açúcar, para os diferentes níveis de tráfego na linha e na entrelinha de cultivo, em um Latossolo Vermelho distroférico, no município de Rio Verde, Goiás.

Nº de passadas	Posição de amostragem	IHO <sup>(1)</sup> (dm <sup>3</sup> dm <sup>-3</sup> )	Fdentro (%)					
			-----FV <sup>(2)</sup> -----			-----FM <sup>(3)</sup> -----		
			P <sup>(4)</sup>	M <sup>(5)</sup>	T <sup>(6)</sup>	P	M	T
0 a 10 cm								
0	EL <sup>(7)</sup>	0,177	84,2	100,0	100,0	100,0	100,0	44,4
	L <sup>(8)</sup>	0,172	84,2	100,0	100,0	100,0	100,0	44,4
2	EL	0,179	84,2	100,0	100,0	100,0	100,0	33,3
	L	0,172	84,2	100,0	100,0	100,0	100,0	44,4
10	EL	0,148	84,2	90,0	97,4	100,0	88,9	11,1
	L	0,172	84,2	96,7	100,0	100,0	100,0	44,4
20	EL	0,055	42,1	43,3	63,2	46,2	11,1	0,00
	L	0,174	84,2	100,0	100,0	100,0	100,0	33,3
10 a 20 cm								
0	EL	0,178	84,2	96,7	100,0	100,0	100,0	22,2
	L	0,174	84,2	100,0	100,0	100,0	100,0	44,4
2	EL	0,178	84,2	100,0	100,0	100,0	100,0	33,3
	L	0,175	84,2	100,0	100,0	100,0	100,0	33,3
10	EL	0,179	84,2	96,7	100,0	100,0	100,0	44,4
	L	0,174	84,2	96,7	100,0	100,0	100,0	44,4
20	EL	0,163	84,2	100,0	100,0	100,0	100,0	33,3
	L	0,177	84,2	100,0	100,0	100,0	100,0	33,3

<sup>(1)</sup> Intervalo Hídrico Ótimo. <sup>(2)</sup> Fase Vegetativa da cana-de-açúcar. <sup>(3)</sup> Fase de Maturação da cana-de-açúcar. <sup>(4)</sup> Cultivar de ciclo precoce. <sup>(5)</sup> Cultivar de ciclo médio. <sup>(6)</sup> Cultivar de ciclo tardio. <sup>(7)</sup> Entrelinha de cultivo da cana. <sup>(8)</sup> Linha de cultivo da cana.

Embora os cultivares de ciclo precoce e médio, quando em solo compactado (T<sub>20</sub>), tenham apresentado Fdentro de aproximadamente 40% em sua fase vegetativa, o mesmo pode não ser deletério, uma vez que o monitoramento da umidade do solo

iniciou em setembro de 2011 para estes dois híbridos de cana, período em que já haviam passado pela fase de brotação, quando estão mais sensíveis ao déficit hídrico, tendo em vista suas datas de colheita (abril e julho de 2011, respectivamente). Sugere-se, portanto, que a irrigação de salvamento aplicada após a colheita das canas-de-açúcar tenha assegurado a brotação e o desenvolvimento inicial dos cultivares em questão.

O mesmo não ocorreu com o cultivar tardio, que apresentou para o  $T_{20}$ , na camada até 10 cm de profundidade, o valor de  $F_{dentro} = 60\%$  na fase vegetativa. Ressalta-se que essas condições refletem o déficit hídrico agravado pela excessiva RP em quase metade do período de crescimento vegetativo, uma vez que a colheita do ciclo anterior ocorreu no início do período chuvoso. Nas condições de menor compactação do solo, o  $F_{dentro}$  se mostrou minimamente reduzido para o cultivar precoce, nos níveis  $\leq 10$  passadas de trator e para os cultivares de ciclo médio e tardio, somente quando submetidos ao  $T_{10}$  (Tabela 4).

Na fase de maturação, na posição EL, profundidade de 0 a 10 cm, os cultivares precoce, médio e tardio ficaram submetidos a condições estressantes ( $T_{20}$ ) em 54, 89 e 100% da fase de acúmulo de sacarose, respectivamente. Nos menores níveis de tráfego, somente o cultivar tardio apresentou valores de  $F_{dentro}$  iguais ou inferiores a 45%. Estes reduzidos valores de  $F_{dentro}$ , quantificados na fase de maturação do cultivar tardio, independentemente dos níveis de tráfego, são consequência do regime hídrico da região (Figura 4) e não da degradação estrutural do solo.

Nas linhas de cultivo das soqueiras, na profundidade até 10 cm, não houve modificação expressiva dos valores de  $F_{dentro}$  em todos os níveis de tráfego, salvo para a fase de maturação do cultivar tardio, em decorrência das avaliações realizadas em parte do período seco (julho a setembro de 2012).

Na profundidade de 10 a 20 cm, posições EL e L, todos os cultivares estiveram expostos à adequada disponibilidade hídrica em grande parte do período vegetativo ( $F_{dentro} > 84\%$ ). No período de maturação dos colmos, apenas o cultivar tardio esteve sob algum tipo de estresse, cujo  $F_{dentro}$  apresentou comportamento semelhante àquele verificado nas posições EL e L, até 10 cm de profundidade (Tabela 4).

A análise de variância das variáveis produtivas e tecnológicas dos cultivares de cana, 1ª soca, encontram-se na Tabela 5. Verifica-se que somente a fonte de variação Cultivar (C) diferenciou apenas para os parâmetros Pol do caldo (S), Pol da cana (PC), Açúcares Totais Recuperáveis (ATR), Fibra (F) e Brix (B). A compactação do solo,

representada pelo Número de Passadas do trator agrícola (N) e a interação dos fatores (N x C) não afetaram a qualidade produtiva e industrial das soqueiras.

A média geral para peso de colmos alcançou 186,6 Mg ha<sup>-1</sup>, valor muito superior (119%) à média brasileira de 85 Mg ha<sup>-1</sup> (MAPA, 2010). A adequada disponibilidade hídrica durante a fase vegetativa de todos os cultivares, em ambas as profundidades avaliadas (Tabela 4), ajudam a explicar a ausência de diferença entre as suas produtividades de colmos, uma vez que o acúmulo de massa na parte aérea é função de boas condições hídricas do solo nesta fase. Por outro lado, a qualidade do material produzido é determinada pela relativa escassez de água na fase de maturação.

Nesse sentido, a pureza do caldo (Q) atendeu ao mínimo proposto por Ripoli & Ripoli (2004) de 85%. Segundo Consecana (2006), a unidade industrial pode recusar o recebimento de carregamentos com Q < 75%. Os níveis de açúcares redutores também se encontram dentro dos limites recomendados (Ripoli & Ripoli, 2004).

**Tabela 5.** Análise de variância, médias gerais e coeficientes de variação para as variáveis produtivas e tecnológicas dos cultivares de cana-de-açúcar cultivados no Latossolo Vermelho distroférrico no município de Rio Verde, Goiás.

Fonte de variação	Quadrados Médios								
	Peso de colmos	S <sup>(1)</sup>	Q <sup>(2)</sup>	PC <sup>(3)</sup>	ATR <sup>(4)</sup>	F <sup>(5)</sup>	AR <sup>(6)</sup>	ARC <sup>(7)</sup>	B <sup>(8)</sup>
Nº passadas (N)	1,139.10 <sup>9</sup> NS	0,121 <sup>NS</sup>	3,477 <sup>NS</sup>	0,100 <sup>NS</sup>	7,517 <sup>NS</sup>	0,084 <sup>NS</sup>	0,005 <sup>NS</sup>	0,003 <sup>NS</sup>	0,077 <sup>NS</sup>
Cultivar (C)	2,017.10 <sup>9</sup> NS	72,875**	14,298 <sup>NS</sup>	49,695**	4367,784**	9,460**	0,017 <sup>NS</sup>	0,015 <sup>NS</sup>	79,547**
N x C	6,122.10 <sup>8</sup> NS	1,283 <sup>NS</sup>	1,922 <sup>NS</sup>	0,991 <sup>NS</sup>	85,081 <sup>NS</sup>	0,342 <sup>NS</sup>	0,023 <sup>NS</sup>	0,002 <sup>NS</sup>	1,319 <sup>NS</sup>
Bloco	4,395.10 <sup>9</sup>	0,442	4,459	0,188	12,312	0,394	0,005	0,004	0,113
Resíduo	6,331.10 <sup>8</sup>	1,126	6,361	0,793	62,754	0,284	0,008	0,006	0,739
Médias	1,866.10 <sup>5</sup>	16,736	87,887	14,487	142,926	10,681	0,626	0,543	19,012
CV (%)	13,48	6,34	2,87	6,15	5,54	4,99	14,08	14,12	4,52

<sup>(1)</sup> Pol do caldo. <sup>(2)</sup> Pureza do caldo. <sup>(3)</sup> Pol da cana. <sup>(4)</sup> Açúcares Totais Recuperáveis. <sup>(5)</sup> Fibra da cana. <sup>(6)</sup> Açúcares Redutores do caldo. <sup>(7)</sup> Açúcares Redutoras da Cana. <sup>(8)</sup> Brix ou porcentagem de sólidos solúveis do caldo. NS Não Significativo. \*\* Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

Para as variáveis em que se constatou significância do teste F, procedeu-se à aplicação do teste de Tukey (p < 0,05). Os resultados são apresentados na Tabela 6.

Os valores de sacarose aparente do caldo e da cana (S e PC, respectivamente), observados em todos os cultivares, atendem o mínimo de 14% proposto por Ripoli & Ripoli (2004). Os valores de S e PC foram superiores no cultivar tardio, em relação aos demais, concordando com Hoffmann et al. (2008).

Os valores de ATR de todos os híbridos superam o padrão de 122 kg t<sup>-1</sup> (Segato et al., 2006). No entanto, somente o cultivar tardio apresenta teores de ATR superiores àquele encontrado na região Centro-Sul, safra 2011/12, cujo valor médio foi de 137,5 kg t<sup>-1</sup> (Unica, 2012). O cultivar tardio difere dos demais híbridos, quanto à quantidade de ATR por tonelada de cana, corroborando com o seu elevado potencial

produtivo e de qualidade, proposto por Hoffmann et al. (2008). Em adição, o estresse hídrico quantificado na maturação do cultivar tardio (Figuras 8 e 9) pode ter contribuído para o destaque do mesmo em relação aos demais, quanto à maior qualidade do caldo extraído (Tabela 6).

**Tabela 6.** Médias dos valores obtidos para as variáveis produtivas e tecnológicas da cana-de-açúcar, segundo corte, cultivada no Latossolo Vermelho distroférico no município de Rio Verde, Goiás.

Ciclo do cultivar	S <sup>(1)</sup> -----%	PC <sup>(2)</sup> -----	ATR <sup>(3)</sup> (kg t <sup>-1</sup> )	F <sup>(4)</sup> -----%	B <sup>(5)</sup> -----
Precoce	15,32 B	13,14 B	130,31 B	11,24 A	17,62 B
Médio	15,31 B	13,49 B	133,60 B	9,66 B	17,44 B
Tardio	19,58 A	16,83 A	164,87 A	11,15 A	21,98 A

<sup>(1)</sup> Pol do caldo. <sup>(2)</sup> Pol da cana. <sup>(3)</sup> Açúcares Totais Recuperáveis. <sup>(4)</sup> Fibra da cana. <sup>(5)</sup> Brix ou porcentagem de sólidos solúveis do caldo. Para cada variável produtiva e tecnológica da cana-de-açúcar, médias seguidas de mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

Os valores de Fibra se encontram entre 11 e 13% (Ripoli & Ripoli, 2004) para os cultivares precoce e tardio. O cultivar de ciclo médio apresentou teor de fibras do colmo inferior ao proposto pelo autor, sendo menor que aquele encontrado nos outros cultivares (Tabela 6). Cabe ressaltar que o baixo teor em fibras confere aos colmos maior suscetibilidade ao acamamento e aos danos mecânicos durante o corte e carregamento, o que culmina com perdas industriais (Segato et al., 2006b). Em afirmação a estas características, detectou-se acentuado tombamento de colmos dos cultivares ciclo médio. No entanto, o acamamento também foi observado, em menor escala, nos cultivares precoce e tardio. A provável causa é a elevada produtividade de colmos associada ao porte elevado e ereto destes dois cultivares.

Em adição, destaca-se que os teores de brix do caldo (B) foram iguais nos cultivares de ciclo precoce e médio, diferindo daquele encontrado no híbrido tardio, que supera os demais em 29%.

Considera-se que a não resposta das variáveis produtivas e industriais aos níveis e tráfego e, portanto, ao estreitamento do IHO, está vinculada aos limites críticos utilizados na determinação do mesmo, sobretudo quanto à resistência à penetração (RP) de 2,5 MPa. A necessidade desta adequação de limites críticos do IHO às diferentes situações de solo, manejo e espécies envolvidas, já foi apontada por Silva et al. (2009). Para os autores, o limite crítico de RP pode ser ampliado, quando se considera Latossolos sob reduzida movimentação mecânica, como é o caso da cana-de-açúcar, cujo ciclo médio de renovação dos canaviais é hoje de 5 anos, no Brasil (MAPA, 2010). Eles afirmam que, embora o solo não sofra revolvimento por longos períodos,



acumulando históricos de tensão, a bioporosidade resultante dos sucessivos cultivos pode atuar como caminhos preferenciais de crescimento radicular, compensando a maior resistência do solo. A presença da bioporosidade foi detectada no solo experimental, mesmo em amostras das parcelas de maior tráfego (T<sub>20</sub>) (Figura 10A).

Phele & Beale (1976) demonstraram que é possível o crescimento prolífico de raízes em solo compactado, com a variação do conteúdo de água do solo, mantendo-o em níveis que permitissem um equilíbrio entre resistência à penetração e deficiência de oxigênio.

Ehlers et al. (1983) afirmam que o crescimento radicular abundante é possível em condições de RP > 3,5 MPa, desde que haja presença de bioporos. Para a cana-de-açúcar, a bioporosidade é advinda do crescimento radicular da cana-planta e soqueiras anteriores. Isso explicaria a adequada produtividade do experimento, mesmo em condições consideradas estressantes pelo IHO.

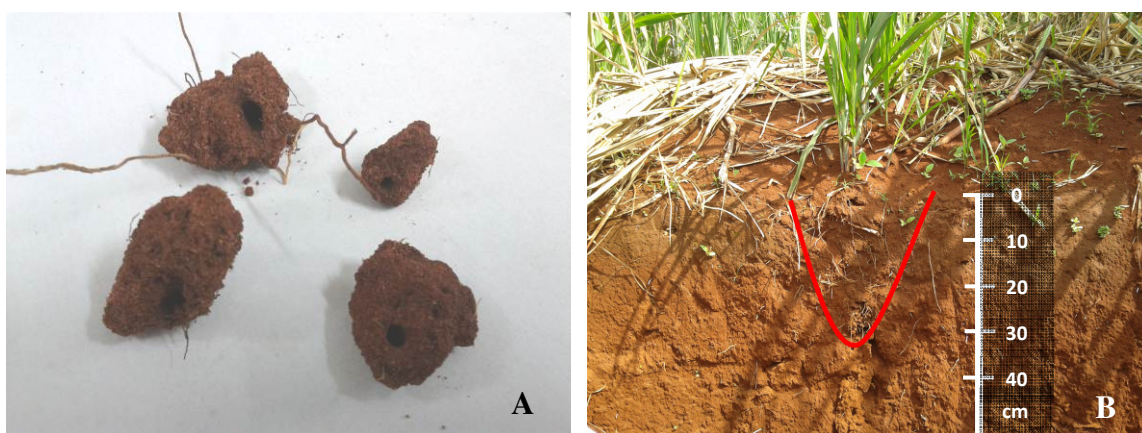
A pressão de turgor celular, na zona de alongação radicular, é a força responsável pelo crescimento das raízes. Para isso, a planta necessita de boa disponibilidade hídrica, condição em que a raiz exercerá a sua pressão de crescimento potencial, que varia de 0,9 a 1,2 MPa (Clark et al., 2003), sobre a matriz do solo, permitindo o seu alongamento. Em adição, a síntese de mucilagem na região da coifa e a diminuta espessura de algumas raízes pode favorecer a superação da resistência imposta pelo solo ao crescimento radicular (Bengough et al., 2006). Desta maneira, os limites críticos de RP, tradicionalmente utilizados na quantificação do IHO, podem não ser restritivos em condições de boa disponibilidade hídrica (Kaiser et al., 2009). Estas características explicam parte do comportamento dos cultivares avaliados frente à compactação do solo.

Por outro lado, a tensão de 0,006 MPa, correspondente à capacidade de campo (CC) em Latossolos de mineralogia oxídica (Mello et al., 2002), é um fator mais intrínseco ao solo do que à planta. A porosidade de aeração (PA) crítica de 10% também pode ser alterada (Jong van Lier, 2001; McQueen & Shepherd, 2002; Micucci & Taboada, 2006), embora nas condições experimentais avaliadas, a PA não limitou a magnitude do IHO.

Outro fator importante para explicar os resultados seria a ausência de tráfego nas entrelinhas de cultivo. Com uma largura de 0,2 metros de superfície sem tráfego, uma profundidade de sulcação de 0,3 metros e comprimento de 27 metros de linhas de cultivo por parcela, houve a formação de um volume de solo estruturalmente adequado,

de  $483 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , representando 16% desta área, sendo que o sistema radicular, nestas condições, cresceu de maneira compartimentalizada (Figura 10B).

Porém como não ocorreu déficit hídrico por quase toda a fase vegetativa dos cultivares e pela possibilidade da demanda por nutrientes ter sido adequadamente suprida nas linhas de cultivo, cujo solo se manteve estruturalmente preservado (Figura 9), sugere-se a ocorrência de compensação do ambiente adverso promovido pela compactação do solo dentro do sulco de plantio, denominado de “efeito de vaso”. Este fenômeno representa o encilhamento do sistema radicular das plantas em um volume de solo reduzido, pela deformação do solo nas entrelinhas de cultivo e, ou em subsuperfície.



**Figura 10.** Possíveis causas da insensibilidade dos cultivares de cana-de-açúcar avaliados, em relação ao aumento da densidade do solo, nas condições experimentais. A: bioporosidade em agregados de solo. B: confinamento das raízes ou “efeito de vaso”.

## CONCLUSÕES

1. Os efeitos deletérios da compactação do solo, evidenciados principalmente pelo aumento da densidade do solo e redução da macroporosidade, ficaram limitados à entrelinha de cultivo das soqueiras, na camada de solo superficial (profundidade < 10 cm);
2. O Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) foi alterado com o incremento do número de passadas do trator, sendo reduzido aos valores próximos de zero no tratamento com 20 passadas do trator agrícola, nas entrelinhas de cultivo da cana-de-açúcar;
3. O monitoramento da frequência de ocorrência da umidade do solo dentro dos limites do IHO ( $F_{dentro}$ ) acusou incidência de condições estressantes à cultura da cana-de-açúcar em termos de disponibilidade hídrica, notadamente na condição de tráfego excessivo ( $n^{\circ}$  de passadas > 10);
4. A inexistência de tráfego nas linhas de cultivo, mantendo o solo destes locais em condições adequadas ao desenvolvimento das plantas pode ter compensado os efeitos prejudiciais da compactação do solo no desenvolvimento dos cultivares de cana-de-açúcar.
5. A superioridade do cultivar tardio quanto ao teor de sacarose aparente, à porcentagem de sólidos solúveis, à porcentagem de fibra, e à quantidade de ATR por tonelada de cana está relacionado a maior disponibilidade hídrica na fase vegetativa e ao maior stress hídrico na maturação da cultura.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BENGOUGH, A.G.; BRANSBY, M.F.; HANS, J.; MCKENNA, S.J.; ROBERTS, T.J.; VALENTINE, T.A. Root responses to soil physical conditions: growth dynamics from field to cell. *Journal of Experimental Botany*, 57: 437-447, 2006.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; CENTURION, M.A.P.C; LEONEL C.L.; JOÃO, A.C.G.S.; FREDDI, O.S. Intervalo hídrico ótimo no monitoramento da compactação e da qualidade física de um Latossolo Vermelho cultivado com soja. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31: 1223-1232, 2007.

BLAINSKI, E.; GONÇALVES, A.C.A.; TORMENA, C.A.; FOLEGATTI, M.V.; GUIMARÃES, R.M.L. Intervalo hídrico ótimo num Nitossolo Vermelho distroférrico irrigado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33: 273-281, 2009.

BLAINSKI, E.; TORMENA, C.A.; GUIMARÃES, R.M.L. & NANNI, M.R. Qualidade Física de um Latossolo Sob Plantio Direto Influenciada pela Cobertura do Solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36: 79-87, 2012.

BRAUNACK, M.V.; ARVIDSSON, J.; HÅKANSSON, I. Effect of harvest traffic position on soil conditions and sugarcane (*Saccharum officinarum*) response to environmental conditions in Queensland, Australia. *Soil & Tillage Research*, 89: 103-121, 2006.

BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to common water content. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 33: 519-524, 1990.

CAMARGO, O.A.; ALLEONI, L.R.F. *Compactação do solo e o desenvolvimento de plantas*. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 1997. 132p

CARVALHO, S.R.; BRUAND, A.; HARDY, M.; LEPRUM, J.C.; JAMAGNE, M. Tassement des sols ferrallitiques Podzólico Vermelho Amarelo sous culture de canne à sucre (état de Rio de Janeiro, Brésil): apport d'une analyse de la porosité associée a une connaissance détaillée de la phase minérale. *Cahiers ORSTOM Série Pedologie*, 26: 195-212, 1991.

CLARK, L.J.; WHALLEY, W.R.; BARRACLOUGH, P.B. How do roots penetrate strong soil? *Plant and Soil*, 255: 93-104, 2003.

CONSECANA - Conselho dos Produtores de Cana-de-açúcar, Açúcar, Alcool do Estado de São Paulo. *Manual de instruções*. 5.ed. Piracicaba: CONSECANA, 2006. 112p.

CORRECHEL, V.; SILVA, A.P.; TORMENA, C.A. Influência da posição relativa à linha de cultivo sobre a densidade do solo em dois sistemas de manejo do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 23: 165-173, 1999.

DIOLA, V.; SANTOS, F. Fisiologia. In: SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDAS, C. (eds.). *Cana-de-açúcar: bioenergia, açúcar e etanol – tecnologias e perspectivas*. 2 ed. Viçosa: Os Editores, 2012. p. 25-49.

EHLERS, W.; KOPKE, V.; HESSE, F.; BOHM, W. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. *Soil and Tillage Research*, 3: 261-275, 1983.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 2. ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e Abastecimento, 2006. 306 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. *Manual de métodos de análises de solo*. Rio de Janeiro: Rio de Janeiro : Embrapa Solos, 2011. 230 p.

FREDDI, O.S. Avaliação do intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho cultivado com milho. Jaboticabal, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2007. 105 p. (Tese de Doutorado).

GONÇALVES, W. G.; SEVERIANO, E. C.; ZEVIANI, W. M.; FLÁVIO NETO, J.; Jayme Junior, L. C. Compactação do solo em decorrência da intensidade de tráfego de um trator agrícola de pequeno porte. In: XXXIII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, Uberlândia. *Anais...*, 2011.

GRABLE, A.R.; SIEMER, E.G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corns roots. *Soil Science Society of America Journal*, 32: 180-186, 1968.

HOFFMANN, H.P.; SANTOS, E.G.D.; BRASSINELLO, A.I.V.; VIEIRA, M.A.S. *Variedades RB de cana-de-açúcar*. Araras: CCA/UFSCar, 2008. 30p.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; DIAS JUNIOR, M.S.; TORMENA, C.A. Quantificação de pressões críticas para o crescimento das plantas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 25: 11-18, 2001.

JONG VAN LIER, Q. Oxigenação do sistema radicular: uma abordagem física. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 25: 233-238, 2001.

KAISER, D.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; COLLARES, G.L.; KUNZ, M. 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, 2009.

KLEIN, V.A.; LIBARDI, P.L.; SILVA, A.P. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes condições de densidade e teor de água. *Engenharia Agrícola*, 18: 45-54, 1998.

LAPEN, D.R.; TOPP, G.C.; GREGORICH, E.G.; CURNOEW, E. Least limiting water range indicators of soil quality and corn production, Eastern Ontario, Canada. *Soil & Tillage Research*, 78: 151-170, 2004.

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*, 28: 415-423, 2004.

LIMA, V.M.P.; OLIVEIRA, G.C.; SERAFIM, M.E.; CURI, N.; EVANGELISTA, A.R. Intervalo Hídrico Ótimo como indicador de melhoria da qualidade estrutural de Latossolo degradado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36: 71-78, 2012.

MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. *Anuário estatístico da agroenergia*, ano: 2010. Disponível em: [www.agricultura.gov.br](http://www.agricultura.gov.br). Acesso em: 26/07/2012.

MCQUEEN, D.J.; SHEPHERD, T.J. Physical changes and compaction sensitivity of a fine-textures, poorly drained soil (Typic Endoaquept) under varying durations of cropping Manawatu Region, New Zealand. *Soil and Tillage Research*, 63: 93-107, 2002.

MELLO, C.R.; OLIVEIRA, G.C.; RESCK, D.V.S.; LIMA, J.M.; DIAS JUNIOR, M.S. Estimativa da capacidade de campo baseada no ponto de inflexão da curva característica. *Ciência e Agrotecnologia*, 26: 836-841, 2002.

MICUCCI, G.F.; TABOADA, M.A. Soil physical properties and soybean (*Glicine max*, Merrill) root abundance in conventionally and zero-tilled soils in the humid Pampas of Argentina. *Soil & Tillage Research*, 86: 152-162, 2006.

OLIVEIRA, G.C.; DIAS JÚNIOR, M.S.; RESCK, D.V.S.; CURI, N. Alterações estruturais e comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho distrófico argiloso sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 38: 291-299, 2003.

OLIVEIRA, G.C.; DIAS JUNIOR, M.S.; RESCK, D.V.S.; CURI, N. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 28: 327-336, 2004.

OLIVEIRA, G.C.; SEVERIANO, E.C.; MELLO, C.R. Dinâmica da resistência à penetração de um Latossolo Vermelho da Microrregião de Goiânia, GO. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 11: 265-270, 2007.

OLIVEIRA, R.A.; RAMOS, M.M.; AQUINO, L.A. Manejo de irrigação. In: SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDAS, C. (Eds.) *Cana-de-açúcar: bioenergia, açúcar e etanol – tecnologias e perspectivas*. 2.ed. Viçosa: Os editores, 2012. p. 217-244.

PETEAN, L.P.; TORMENA, C.A.; ALVES, S.J. Intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto em sistema de integração lavoura-pecuária. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 34: 1515-1526, 2010.

PHELE, C.J.; BEALE, O.W. High-frequency irrigation for water nutrient management in humid regions. *Soil Science Society of America Journal*, 40: 430-436, 1976.

RICHARDS, L.A.; WEAVER, L.R. Fifteen-atmosphere percentage as related to the permanent wilting percentage. *Soil Science*: 56: 331-340, 1943.

RIPOLI, T.C.C.; RIPOLI, M.L.C. *Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente*. Piracicaba, 2004. 302 p.

SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C. F. M.; MOZAMBANI, A. E. Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J. C. M. (Org.). *Atualização em produção de cana-de-açúcar*. Piracicaba : CP. p. 11-18. 2006a.

SEGATO, S.V.; ALONSO, O.; LAROSA, G. Terminologias no setor sucroalcooleiro. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J. C. M. (Org.). *Atualização em produção de cana-de-açúcar*. Piracicaba : CP. p. 397-405. 2006b.

SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; DIAS JUNIOR, M.S.; OLIVEIRA, L.F.C.; CASTRO, M.B. Pressão de preconsolidação e intervalo hídrico ótimo como indicadores de alterações estruturais do solo em decorrência das operações de colheita da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32: 1419-1427, 2008.

SEVERIANO, E. C. *Alterações estruturais de Latossolos representativos da região do Cerrado e potencial de uso de solos cultivados com cana-de-açúcar*. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Departamento de Ciência do Solo, Universidade de Lavras, MG. 134p. 2010.

SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; DIAS JÚNIOR, M.S.; COSTA, K.A.P.; SILVA, F.G.; FERREIRA FILHO, S.M. Structural changes in latosols of the Cerrado region: I – relationships between soil physical properties and least limiting water range. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35: 783-791, 2011.

SILVA, A.P.; KAY, B.D. Effect of soil water content variation on the least limiting water range. *Soil Science Society American Journal*, 61: 884-888, 1997.

SILVA, A.P.; KAY, B.; PERFECT, E. Management versus inherent soil properties effects on bulk density and relative compaction. *Soil & Tillage Research*, 44: 81-93, 1997.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; TORMENA, C. A.; IMHOFF, S. Least limiting water range of soils. In: LAL, R. (Org.). *Encyclopedia of Soil Science*, 1: 1026-1029, 2006.

SILVA; R.B.; LANÇAS, K.P.; MIRANDA, E.E.V.; SILVA, F.A.M; BAIIO, F.H.R. Estimation and evaluation of dynamic properties as indicators of changes on soil structure in sugarcane fields of Sao Paulo State – Brazil. *Soil & Tillage Research*, 103: 265-270, 2009.

SOUSA, D.M.; LOBATO, E. *Cerrado: correção do solo e adubação*. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004.

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*, 22: 573-581, 1998.

TORMENA, C.A.; ARAUJO, 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*, 31: 211-219, 2007.

UNICA – União da Indústria da Cana-de-Açúcar. *Relatório final da safra 2011/2012 - Região Centro-Sul*. Disponível em: <http://www.unica.com.br/unicadata> . Acesso em: 03/10/2012.